

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Optimalizace nepřímého odporového ohřevu
Indirect resistance heating optimalization

2010

Bc. Tomáš Zbránek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Zbránek**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Optimalizace nepřímého odporového ohřevu**
Indirect resistance heating optimization

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor problematiky odporového ohřevu
2. Možnosti řízení odporové pece, měření a regulace teploty
3. Stanovení parametrů optimalizace
4. Zpracování zvoleného řešení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Hradílek, Z.: Elektrické teplo. Skriptum VŠB-TU Ostrava 1996.
- [2] Hradílek, Z. a kol.: Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy. Skripta VŠB-TU, Ostrava 2001.
- [3] Rada, J. a kol.: Elektrotepelná technika, SNTL 1985.
- [4] Sajdak, C.: Elektrotermia. Skrypta Politechniki Slaskiej nr.1863, Gliwice 1984.
- [5] Hering, M.: Podstawy elektrotermii, cz.I. Wydawnictwo naukowo-techniczne, Warszawa 1998.
- [6] Kreidl, M.: Měření teploty - senzory a měřicí obvody, BEN Praha 2005.
- [7] Kainka, B.: Měření, řízení a regulace pomocí PC, BEN Praha 2003.
- [8] Manuály k PC měřicím kartám (PCL, PCA).

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Král, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Královi za jeho pomoc při řešení zadané práce.

6. 5. 2010

Podpis:

Abstrakt a klíčová slova

Abstrakt: S vývojem výpočetní techniky, je možné aplikovat počítač s měřicí technikou, pro měření na elektrických odporových pecích. A s použitím vhodného software lze zaznamenávat a dále zpracovávat naměřená data a to nám dává možnost k jejich dalším analýzám, porovnáváním výsledků s teoretickými předpoklady.

V mé diplomové práci se zabývám měřením na muflové peci MP05-0.1, jde o elektrickou pec s nepřímým odporovým ohřevem vsázky. Z výstupních hodnot, které program PEC zaznamenává, jsou počítány ztráty pece a energie, která je potřebná k ohřátí vzorků a je porovnávána s teoretickými hodnotami.

Klíčová slova: almemo, energie, měření, muflová pec, nepřímý odporový ohřev, Program PEC, termočlánek, vsázka, ztráty.

Abstract: With the development of computer technology, it is possible to use a computer measurement technique for measuring the electrical resistance furnaces. And with the use of appropriate software can record and process the measured data and this gives us the opportunity for their further analysis, comparing the results with theoretical expectations. In my diploma thesis deals with measuring the muffle furnace MP05-0.1, it is an electric furnace with indirect resistive heating load. The output values PEC program notes are counted loss furnaces and the energy needed for heating samples and are compared with theoretical values

Key words: Almemo, energy, measurement, muffle furnace, indirect resistance heating, program PEC, thermocouple, batch, losses.

Seznam použitých značek

A_v	Povrch kterým přijímá vsázka teplo	(m^2)
Bi	Biotovo podobnostní kritérium	(-)
P_u	Užitečný tepelný výkon	(W)
P_Z	Ztrátový tepelný výkon	(W)
W	Energie potřebná k ohřevu vsázky	(Wh)
W_m	Měrné spotřeba	(Wh.Kg ⁻¹)
R	Odpor materiálu	(Ω)
S	Plocha	(m^2)
c	Měrná tepelná kapacita vzorku	(Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
f	Frekvence	(Hz)
l	Šířka stěny	(m)
m	Hmotnost vsázky	(Kg)
t_n	Doba ohřevu (n-tý interval)	(s)
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot	(°C,K)
Θ	Teplota termodynamická	(K)
α	Součinitel přestupu tepla	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
α_k	Součinitel přestupu tepla konvekci	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
α_r	Součinitel přestupu tepla radiací	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
ε	Emisivita materiálu	(-)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	(W.m ⁻¹ K ⁻¹)
ρ	Hustota	(Kg.m ⁻³)
σ_ε	Stefan-Boltzmanova konstanta	(W. m ⁻² .K ⁻⁴)
ϑ	Teplota	(°C, K)
$\vartheta_p; T_P$	Teplota v komoře pece	(C)
$\vartheta_{vs}; T_{vs}$	Teplota vsázky	(C)

Obsah

ÚVOD	1
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ODPOROVÉHO OHŘEVU	2
1.1 FYZIKÁLNÍ ZÁKONY ŠÍŘENÍ TEPLA	2
1.2 ŠÍŘENÍ TEPLA VEDENÍM	2
1.2.1 <i>Prostup tepla rovinnou stěnou</i>	3
1.2.2 <i>Prostup tepla složenou rovinnou stěnou</i>	3
1.2.3 <i>Prostup tepla válcovou stěnou</i>	4
1.2.4 <i>Prostup tepla složenou válcovou stěnou</i>	4
1.3 PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM	5
1.4 ŠÍŘENÍ TEPLA SÁLÁNÍM	6
1.5 ELEKTRICKÉ TEPLA ODPOROVÉ	7
1.5.1 <i>Nepřímý odporový ohřev</i>	7
2 MOŽNOSTI REGULACE, VOLBOU VHODNÉHO PROGRAMU REGULACE	9
2.1 MĚŘENÍ TEPLoty	9
2.1.1 <i>Termoelektrické články</i>	11
2.1.2 <i>Typy termoelektrických článků</i>	11
2.2 REGULACE ELEKTRICKÝCH ODPOROVÝCH PECÍ	15
3 VÝPOČET DOBY OHŘEVU	17
3.1 VÝPOČET DOBY OHŘEVU	17
3.2 VÝPOČET DOBY OHŘEVU VSÁZKY V ELEKTRICKÉ ODPOROVÉ PECI SE STABILNÍ VSÁZKOU	19
3.2.1 <i>Přibližný rychlý způsob výpočtu doby ohřevu tenké vsázky</i>	20
4 POPIS POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ	22
4.1 POPIS MUFLOVÉ PECE	22
4.2 POPIS MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE ALMEMO	26
4.3 POUŽITÉ TERMOČLÁNKY	27
4.4 PROGRAM PEC	28
5 MĚŘENÍ NA MUFLOVÉ PECI MP05-0.1	30
6 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	32
6.1 ZTRÁTY PECE	32
6.1 VÝPOČET BIOTOVA PODOBNOSTNÍHO KRITÉRIA	38
6.2 VÝPOČET HMOTNOSTI Z ROZMĚRŮ VSÁZKY A URČENÍ ENERGIE POTŘEBNÉ K OHŘEVU	39
6.3 CHYBY MĚŘENÍ	42
7 ZÁVĚR	43

Úvod

Elektrická energie je jedna z nejušlechtilějších energií vůbec, protože je vhodná k přeměně na jiné formy energií. Pro nás jsou nejdůležitější energie tepelná a mechanická, tyto energie jsou nezbytné pro všechny výrobní odvětví a různé procesy. Nejmodernější výrobní technologie jsou velmi často na použití elektrického tepla přímo založeny a nebyly by jinak vůbec realizovatelné (v jaderné energetice, ve sklářském průmyslu, ve výrobě plastů atd.).

Zabývám se zde nepřímým odporovým ohřevem, kde ohřev probíhá přeměnou elektrické energie na teplo v odporovém topném článku, ze kterého teplo přenášeno pomocí konvence, kondukce, radiace nebo složeným způsobem do ohřívané vsázky.

V první části mé diplomové práce popisují teoretické základy elektrického tepla a popisují zákony šíření tepla vedením, prouděním a sáláním. V dalších kapitole popisují měření teploty, zde je uvedeno rozdělení teploměrů, protože v praktické části byly použity termočlánky, které jsou nejvhodnější pro měření teploty v odporové peci, zaměřuji se hlavně na ně, dále zde popisují regulaci v odporových pecích. A také teoretický výpočet doby ohřevu vsázky v peci s nepřímým odporovým ohřevem. V praktické části diplomové práce popisují měření na muflové peci MP05-0.1, všechny použité přístroje a software. V poslední části diplomové práce se zabývám vyhodnocováním naměřených údajů hlavně ztrátami pece, dále je zde počítána energie potřebná k ohřátí vsázky, kterou porovnávám s teoretickými předpoklady.

1 Úvod do problematiky odporového ohřevu

1.1 Fyzikální zákony šíření tepla

Teplo se přenáší z tělesa teplejšího na těleso studenější třemi způsoby:

1. Vedením (kondukcí) v tuhých tělesech
2. Prouděním (konvekcí) v kapalném nebo plynném prostředí
3. Sáláním nebo také zářením (radiací)

V praxi se většinou tyto přenosy tepla objevují společně. Při konkrétních způsobech řešení však můžeme uvažovat s každým způsobem šíření odděleně a celkovou přenesenou energii dostaneme jako součet energií přenášených jednotlivými způsoby.

1.2 Šíření tepla vedením

Uvnitř pevných těles nebo v jejím těsném dotyku dochází k přenosu tepla vedením. Teplo, podobně jako magnetická nebo elektrická energie, vytváří kolem sebe tzv. tepelné pole. Tepelné pole je množina okamžitých teplot všech bodů zkoumané části prostoru a je polem skalárním:

$$\mathcal{G} = f(x, y, z, \tau)$$

platí-li:

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} = 0 \quad (1.2.1)$$

Pak se jedná o pole stacionární:

$$\mathcal{G} = f(x, y, z)$$

Při výpočtu tepelných ztrát a tepelné pohody prostředí se předpokládá ustálený stav, řeší se případ stacionárního tepelného pole. Skutečné kolísání teplot v čase se zohlední v přidavných koeficientech uplatňovaných v užívaných vztazích. Spojnice míst se stejnou hladinou tepelné energie se nazývají izotermie (izotermické plochy) a jsou to místa se stejnou teplotou. Největší změny teploty nastávají ve směru normály k izotermické ploše. Limitní hodnotou teplotního spádu je gradient teploty:

$$- \text{grad}(\mathcal{G}) = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathcal{G}}{\Delta n} \mathbf{n}_0 \quad (1.2.2)$$

Je to vektor kolmý k izotermické ploše. Množina teplotních gradientů tvoří vektorové pole. Existence pole (je-li nenulové $\mathcal{G} = \text{konst.} \leftrightarrow \text{grad}(\mathcal{G}) = 0$) znamená, že v prostoru dochází k šíření tepla. Ve většině aplikací je možné problematiku vedení tepla zjednodušit. Nejčastěji řešenými případy jsou:

- Prostup tepla rovinou stěnou
- Prostup tepla válcovou stěnou

1.2.1 Prostup tepla rovinnou stěnou

Množství tepla, které projde za 1 sekundu částí S nekonečné stěny. Je úměrné vodivosti λ , rozdílu teplot povrchů stěny, ploše S a nepřímo úměrné tloušťce stěny l . Isotermické plochy jsou souosé s rozhraním. Pro tepelný tok při prostupu tepla stěnou platí:

$$Q = S \cdot \lambda \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{l} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{l}{S \cdot \lambda}} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_t} \quad (1.2.1.1)$$

Jestliže oba povrchy uvažované stěny nemají stejnou plochu, pak při výpočtu dosazujeme za S geometrický střed obou ploch.

$$S_{STR} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad \text{a platí:} \quad (1.2.1.2)$$

$$Q = \lambda \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{l} \cdot S_{STR} \quad (1.2.1.3)$$

Q	Tepelný tok	(W)
S	Plocha stěny	(m ²)
S_{STR}	Geometrický střed obou ploch	(m ²)
l	Šířka stěny	(m)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
R_t	Tepelný odpor stěny	(Ω)
ϑ_1	Teplota na povrchu stěny	(K)
ϑ_2	Teplota na povrchu stěny	(K)

Chceme-li zjistit teplotu v bodě x platí:

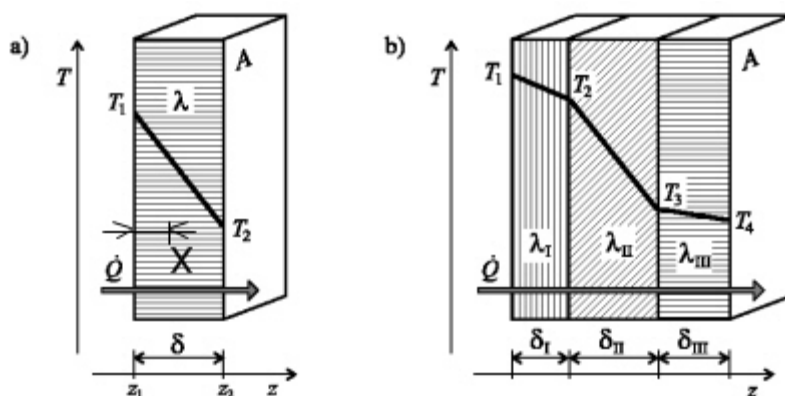
$$\vartheta_x = \vartheta_1 - \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{l} \cdot x \quad (1.2.1.4)$$

ϑ_x	Teplota v bodě X	(K)
x	Vzdálenost bodu X	(m)

1.2.2 Prostup tepla složenou rovinnou stěnou

$$Q = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\left(\frac{l_1}{\lambda_1 \cdot S} + \frac{l_2}{\lambda_2 \cdot S} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n \cdot S} \right)} \quad (1.2.2.1)$$

Q	Tepelný tok	(W)
S	Plocha stěny	(m ²)
l_1	Šířka stěny 1	(m)
λ_1	Součinitel tepelné vodivosti stěny jedna	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)

Obr. 1 a) Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou b) složenou rovinnou stěnou ($T = \vartheta$; $\delta = l$)

1.2.3 Prostup tepla válcovou stěnou

V dutině válce je prostředí o teplotě ϑ_1 a vnitřní povrch o poloměru r_1 , vně válce nechť je prostředí o teplotě ϑ_2 a vnějším poloměru r_2 . Tepelný tok má radiální směr od vnitřního k vnějšímu povrchu, izotermické plochy jsou souosé válce. Průběh teplot v závislosti na poloměru má tvar logaritmické křivky, proto platí vztah:

$$dQ = \frac{\lambda}{dr} \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot l \cdot d\vartheta \quad (1.2.3.1)$$

Integrací od r_1 do r_2 dostáváme vztah:

$$Q = \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot l \cdot (\vartheta_{p1} - \vartheta_{p2}) \quad (1.2.3.2)$$

1.2.4 Prostup tepla složenou válcovou stěnou

$$Q = \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \cdot l \cdot (\vartheta_{p1} - \vartheta_{p2}) \quad (1.2.4.1)$$

Q	Tepelný tok	(W)
l	Délka válce	(m)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
ϑ_{p1}	Teplota prostředí uvnitř válce	(K)
ϑ_{p2}	Teplota prostředí vně válce	(K)
r_1	Vnitřní poloměr	(m)
r_2	Vnější poloměr	(m)

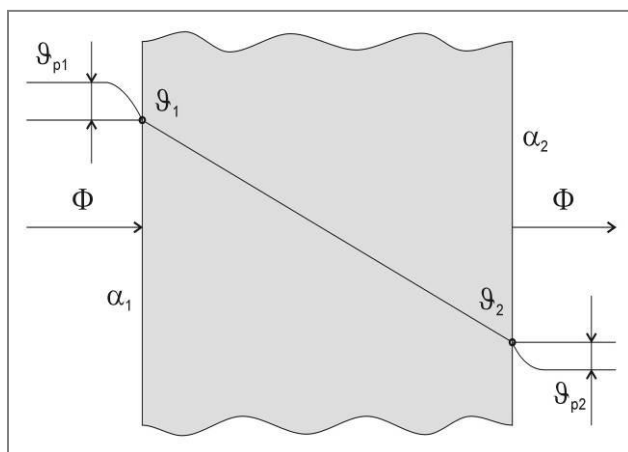
1.3 Přenos tepla prouděním

V kapalném a plynném prostředí dochází ke sdílení tepla prouděním kapaliny nebo plynu. Pohyb může být způsoben jak vnějšími vlivy (nucené proudění), tak i závislostí měrné hmotnosti na teplotě (gravitací). Na rozhraní pevného a kapalného (nebo plynného) prostředí dochází k prostupu tepla podle vztahu:

$$Q = \alpha_p \cdot S \cdot \Delta \vartheta \quad \text{Newtonův zákon} \quad (1.3.1)$$

Q	Předané teplo	(W)
α_p	Součinitel přestupu tepla prouděním	(W/m ² K)
S	Obsah plochy, kterou se teplo předává	(m ²)
$\Delta \vartheta$	Rozdíl teplot	(K)

Přenos tepla prouděním je důležitý zejména u odporové pece s umělou cirkulací atmosféry. Šíření tepla prouděním má význam u elektrických pecí zejména při nižších teplotách. Tímto způsobem počítáme ztráty ochlazováním vnějším povrchem u pecí odporových a obloukových atd. Při vyšších teplotách se uplatňuje více sálání tepla. Na obrázku (Obr. 2), je vyznačená svislá stěna odporové pece. Kde určitý stalý tepelný tok bude procházet stěnou k vnějšímu povrchu pece. Na vnitřním povrchu stěny vznikne teplota $\vartheta_1 < \vartheta_{p1}$. Na vnějším povrchu bude teplota povrchu $\vartheta_2 > \vartheta_{p2}$.



Plynné prostředí (vzduch) v blízkosti povrchu pece se bude zahřívat, a protože ohřátý vzduch je lehčí nežli studený, nastane podél stěny přirozené proudění vzduchu. Mezi teplotou prostředí a teplotou povrchu je-li v ustáleném stavu teplotní rozdíl daný tím, že na povrchu stěny lpí vždy tenká vrstva plynu, která se proudění neúčastní. Touto vrstvou prochází tepelný tok pouze, vedením, a protože tepelná vodivost plynů je malá, nastává zde teplotní skok.

Obr. 2 Přenos tepla prouděním

Pro tepelný tok při sdílení tepla prouděním platí:

$$Q = \alpha \cdot S (\vartheta_{p1} - \vartheta_1) \quad (W) \quad (1.3.2)$$

$$Q = \alpha \cdot S (\vartheta_2 - \vartheta_{p2}) \quad (W) \quad (1.3.3)$$

ϑ_1	Teplota na povrchu stěny	(K)
ϑ_2	Teplota na povrchu stěny	(K)
α	Součinitel přestupu tepla	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
ϑ_{p1}	Teplota v prostředí 1	(K)
ϑ_{p2}	Teplota v prostředí 2	(K)

Součinitel přestupu tepla α závisí na mnoha činitelích, např. rozměry, tvar, plocha, drsnost povrchu, viskozita, rychlost proudění.

1.4 Šíření tepla sáláním

Každé těleso, jehož teplota je větší než nula Kelvinů (absolutní nula), vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. Je to elektromagnetické vlnění, které se v průzračném prostředí šíří přímočaře a všemi směry. Každé těleso vyzařuje, ale také absorbuje energii vyzařovanou jinými tělesy. Každé těleso se zahřívá, když přímá více než vyzařuje, nebo se ochlazuje, když převažuje jeho vlastní vyzařování. Absolutně prázdný prostor je dokonale průzračný pro procházející záření, každé jiné prostředí záření částečně pohlcuje. Při dopadu tepelného záření na částečně průzračné těleso se část energie pohltí a přemění na teplo, část se odrazí a část projde tělesem, je-li těleso průzračné.

Výměna výkonu sáláním mezi dvěma tělesy

Dvě plochy, z nichž větší plocha A_2 zcela prostorově obklopuje menší plochu A_1

$$P = \frac{A_1 \cdot \sigma_{\epsilon}}{\frac{1}{\epsilon_1} \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \cdot \left[\left(\frac{\Theta_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100}\right)^4 \right] \quad (\text{W}) \quad (1.4.1)$$

Je-li $A_2 \gg A_1$ nebo ϵ_2 se blíží 1, potom můžeme vztah zjednodušit:

$$P \approx A_1 \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma_{\epsilon} \cdot \left[\left(\frac{\Theta_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100}\right)^4 \right] \quad (1.4.2)$$

σ_{ϵ} Boltzmannova konstanta,

$$\sigma_{\epsilon} = 5,674 \left(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \left(\frac{\text{K}}{100}\right)^{-4} \right)$$

P	Vyzařovaný výkon	(W)
$\epsilon_{1;(2)}$	Emisivita materiálů (Vsázka; Pec)	(-)
A_1	Menší plocha (Vsázka)	(m ²)
A_2	Větší plocha (Pec)	(m ²)
Θ_1	Teplota menší plochy (Vsázky)	(K)
Θ_2	Teplota větší plochy (Pece)	(K)

V kapitolách 1.1 až 1.4 byla použita literatura [1],[2]a[8].

1.5 Elektrické teplo odporové

Elektrická energie se mění v tepelnou podle Joulova zákona

Rozdělení: Přímý odporový ohřev
 Nepřímý odporový ohřev

1.5.1 Nepřímý odporový ohřev

V zařízení s nepřímým odporovým ohřevem vzniká teplo v topných člancích, umístěných přímo v pecním prostoru zařízení. Do vsázky se pak teplo přenáší převážně sáláním topných článků a vyzdívky, prouděním atmosféry (vzduchu) v pecním prostoru, nebo vedením tepla. Elektrotepelná zařízení s nepřímým ohřevem takzvané odporové pece, lze dělit podle několika hledisek:

Podle teploty pece:

- Nízkoteplotní pece: do 600 °C
- Středoteplotní pece: od 600 °C do 1 100 °C
- Vysokoteplotní pece: nad 1 100 °C

Podle atmosféry v pecním prostoru pece:

- S atmosférou normální (vzduch)
- S atmosférou řízenou (např. pro nauhličování, nitridaci, pro zamezení oxidace aj.)
- Pracující s vakuem – vakuové pece

Podle použití v provozu na pece:

- Pro tepelné zpracování kovů
- Pro tavení kovů
- Pro tavení skla
- Pro chlazení skla
- Pro laboratoře, pro domácnosti
- S infračerveným ohřevem atd.

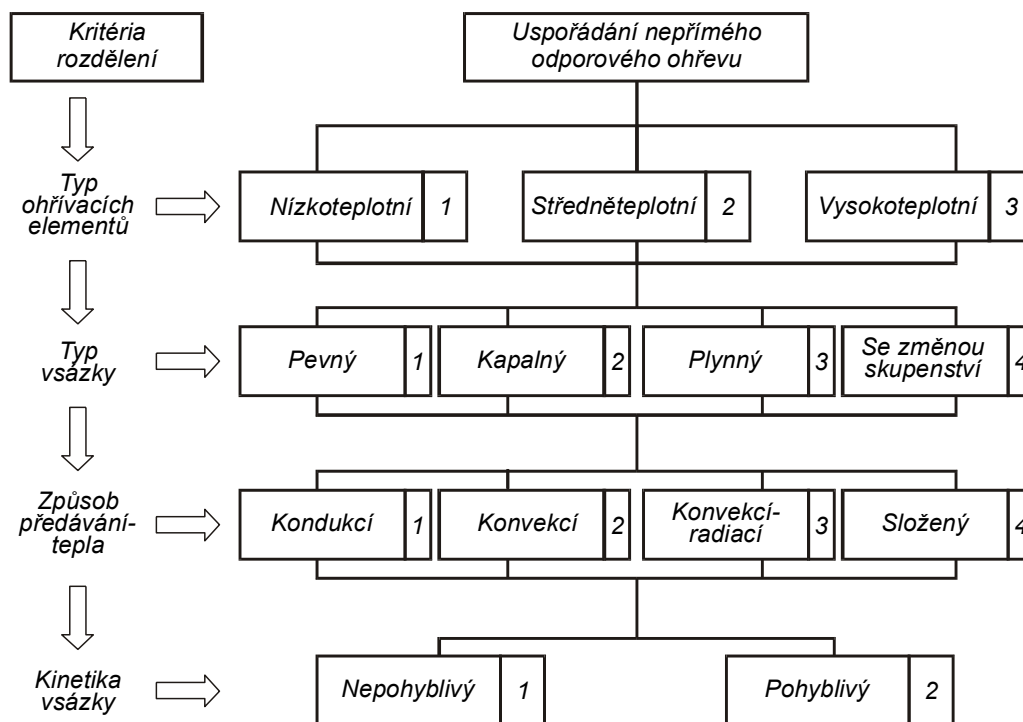
Podle toho, zda se vsázka při ohřevu nepohybuje nebo se pohybuje, na pece:

- Se stabilní - nepohybující se vsázkou, přerušovaný provoz.
- Se vsázkou procházející pecí – pece průběžné, s pohyblivým dnem, nepřerušovaný provoz.

Podle tohoto posledního kritéria rozdělujeme dále pece podle způsobu řízení na:

- Odporové pece se stabilní vsázkou: komorové, vozové, šachtové, poklopové (zvonové), elevátorové a kelímkové tavící pece.
- Odporové pece průběžné: pásové, válečkové, narážecí, střešací, krokové, protahovací, bubnové a karuselové (rotační) pece.

Rozdělení pecí



Obr. 3 Rozdělení elektrických odporových pecí

Materiály a součásti elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem

Odporová pec s nepřímým ohřevem je tvořena těmito základními částmi:

1. Žárovzdorná vyzdívka
2. Tepelná izolace
3. Skříň pece
4. Topné články
5. Podávací mechanismy a jejich pohony

Kromě toho mohou být pece vybaveny zařízeními pro výrobu ochranné atmosféry nebo vakua.

Všechny pece jsou vybaveny přístroji pro měření a regulaci teploty a mohou mít i řízené zdroje proudu.

Vysokoteplotní pece

Většina vysokoteplotních pecí jsou pece statické. Většinou jsou to pece komorové, šachtové nebo válcové. Stavějí se však i průběžné a průchozí pece se zařízením z karbidu křemíku nebo keramiky, karuselové a krokovací pece. Pece s topnými články z karbidu křemíku se používají do 1400 °C, z dvojsilicidu molybdenu do 1750 °C, pece s molybdenovými topnými články se používají ve vakuu do 1650 °C, v ochranné atmosféře do 2000 °C. Vakuové pece s grafitovými elektrodami se používají do 2600 °C.

Nízkoteplotní pece

Odlišují se od středoteplotních a vysokoteplotních jednak konstrukcí a jednak přenosem tepla. Největší část tepla se přenáší prouděním (konvekci). Hranice mezi nízkoteplotními a středoteplotními pecemi leží mezi 600 °C až 700 °C. Tato skupina pecí zahrnuje všechny druhy sušících pecí, kalici pece a všechny pece pro tepelné a tepelně-mechanické zpracování kovů.

Pece s přirozeným prouděním vzduchu

Jsou nejjednodušší nízkoteplotní pece, vyráběné s přirozeným prouděním vzduchu. Jsou to skříňové nebo komorové pece různého tvaru s topnými články ve dně nebo bočních stěnách. Ohřívání předmětů se musí odstínit od topných článků, aby nedošlo k přehřátí. Přenos tepla se děje přirozenou konvekci. Koeficient sdílení tepla při přirozené konvenci je malý, mají tyto pece malou rychlost ohřevu a tím i malou výkonnost.

Pece s nuceným prouděním vzduchu

Tepelné zpracování předmětů lze zlepšit umělým (nuceným) prouděním vzduchu. Proto jsou ve stropní části pece umístěny ventilátory, které teplý vzduch nasávají a vedou do spodní části pece. Odtud teplý vzduch stoupá opět nahoru. Takový uzavřený oběh vzduchu zvětšuje účinnost pece. Má-li se však vysoušet jakostně, musí se vypařená vlhkost ze vzduchu odstranit. Proto se používá vzduchový oběh s podílem čerstvého vzduchu, který nahrazuje ztráty při vysušování. Maximální teplota u těchto pecí se pohybuje od 200 °C do 300 °C, proto mohou být všechny vnitřní části z oceli a mnohdy chybí i žáruvzdorná vyzdívka. Je-li pec velká a požadavky na rovnoměrnost vysoké, je složité vytvořit odpovídající proudění v peci. V takových případech se umísťuje ventilátor a topná tělesa do zvláštní komory – ohříváče vzduchu.

V kapitole 1.5 byla použita literatura [1],[2] a [3].

2 Možnosti regulace, volbou vhodného programu regulace

2.1 Měření teploty

Teplota

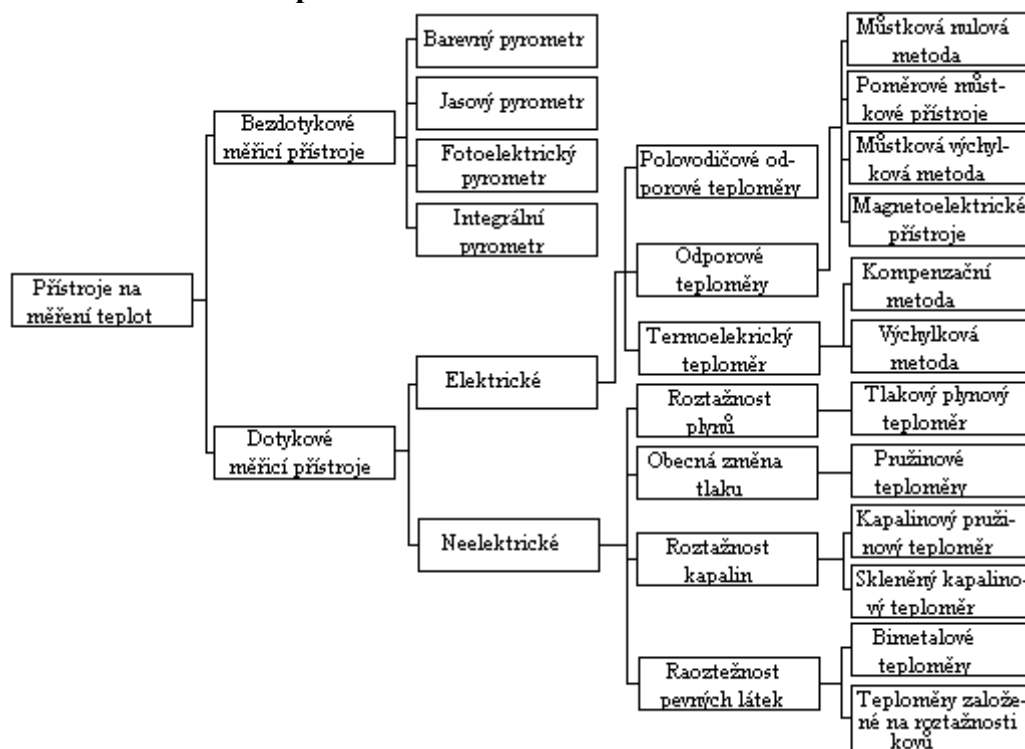
Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je, stav soustavy popsán nezávisí na čase. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo, neboť teplo je

forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles, ale není stavovou veličinou, neboť nezávisí na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti vývoje této soustavy. Teplota je jedná z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy nepřímé.

Senzory teploty

Senzor teploty je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce tj. blok, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem senzor je ekvivalentní pojmu snímač teploty (samostatná konstrukční součást teploměrového zařízení, která obsahuje teplotní čidlo), ale také pojmu čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu). Stejně tak se jako senzor teploty označuje detektor tepelného zařízení nebo teploměr (zařízení k měření teploty).

Základní rozdělení teploměrů

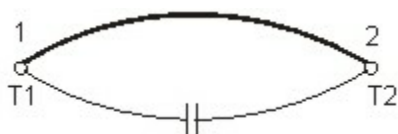


Obr. 4 Základní rozdělení teploměrů

V praktické části diplomové práce jsou použity, termoelektrické snímače teploty, které patří mezi kontaktní snímače používané k dálkovému měření teploty a jejich čidlo (termoelektrický článek) převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického napětí. Konkrétně termočlánek typu K, kvůli své ceně, teplotnímu rozsahu a požadavkům na kompatibilitu s měřicím přístrojem almemo.

2.1.1 Termoelektrické články

Termoelektrické články jsou založeny na Seebeckově jevu, tj. na převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositele náboje větší energii (v polovodičích i větší prostorovou hustotu, tj. koncentraci) a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tím vzniká jednostranná převaha nábojů kladných nebo záporných, a proto znaménka absolutních Seebeckových koeficientů souhlasí se znaménkem těch nositelů nábojů, kterých je ve vodiči více. Termoelektrický článek převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického napětí. Využívá se přitom toho, že jestliže jsou v jednoduchém elektrickém obvodu, tvořeném dvěma vodiči z různých kovů, viz. Obr. 5



Obr. 5

oba jejich spoje 1 a 2 umístěny v prostředí se dvěma různými teplotami T_1 a T_2 , začne obvodem procházet elektrický proud. Pokud obvod v naznačeném místě přerušíme a zařadíme do něj vhodný měřicí přístroj, naměříme malý rozdíl elektrických potenciálů, který je funkcí rozdílu teplot $T_2 - T_1$. Tento rozdíl potenciálů se nazývá termoelektrické napětí. Takto je zjednodušeně popsán takzvaný Seebeckův jev, na kterém je založeno měření teploty termoelektrickými články (termočlánky). K Seebeckovu jevu existuje jev opačný, který se nazývá Peltierův jev. Ten se projevuje tak, že při průchodu elektrického proudu zmíněným elektrickým obvodem se z jeho spojů jeden zahřívá a druhý naopak ochlazuje. Změřené napětí udává rozdíl teplot mezi teplým a studeným spojením termoelektrického článku. Je proto důležité, aby studený spoj byl udržován na stálé teplotě. Vztah mezi napětím a teplotou závisí jedině na složení použitých kovů a nezávisí na průřezu nebo délce těchto drátů. Matematicky lze vyjádřit velikost napětí pro malý rozdíl teploty mezi studeným a teplým spojením.

$$E = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_2) + \alpha_2 \cdot (T_2 - T_1) = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.1.1.1)$$

α ...termoelektrický koeficient $(\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$

T_1 ...teplota na konci 1 (K)

T_2 ...teplota na konci 2 (K)

Pro větší teplotní rozdíl je nutno respektovat značnou nelinearitu závislosti $E=f(\Delta t)$ a použít polynomy vyšších řádů. Pokud bude teplota $T_2=0$ K.

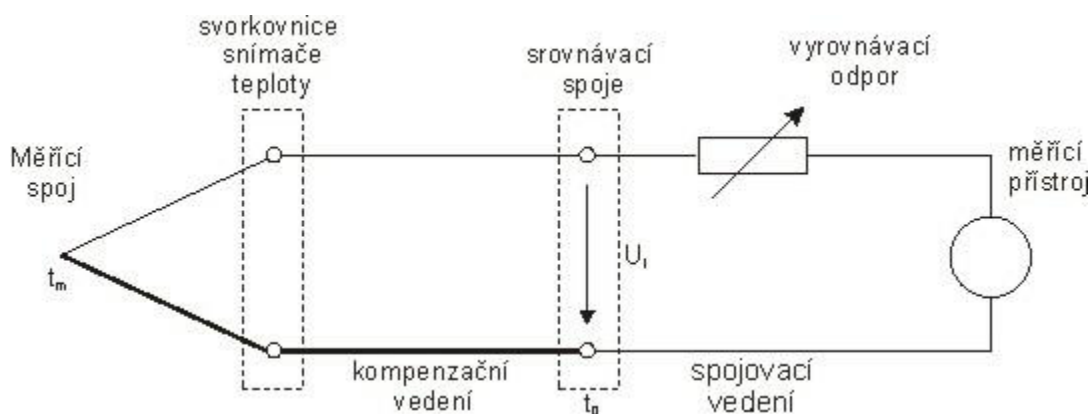
$$E = \sum_{i=0}^n \alpha_i t^i \quad (2.1.1.2)$$

2.1.2 Typy termoelektrických článků

Uvedli jsme, že termoelektrické napětí vzniká, jestliže navzájem spojíme vodiče ze dvou různých kovů. Pak vznikne při rozdílné teplotě mezi spojenými a volnými konci drátů na jejich volných koncích napětí, které je úměrné rozdílu teplot. Změřené napětí udává rozdíl teplot mezi teplým a studeným spojením termoelektrického článku. Je proto důležité, aby studený spoj byl udržován na stálé teplotě. Vztah mezi napětím a teplotou závisí jedině na složení použitých kovů a

nezávisí na průřezu nebo délce těchto drátů. Z hlediska měření je však potřebné, aby generované termoelektrické napětí bylo co největší, a aby oba kovy byly co nejodolnější proti vlivům okolního prostředí, tak aby se jejich vlastnosti co nejméně měnily v průběhu času. Tomu vyhovuje jen několik dvojic materiálu a jejich složení je proto normováno, takže vlastnosti stejně označených termočlánků vyrobených různými výrobci jsou shodné. V současné době se doporučuje používat termočlánky dle normy IEC 584-1, respektive ČSN IEC 584-1, nebo EN 60584-1. Tato norma obsahuje tabulky základních hodnot termoelektrického napětí jednotlivých termočlánků a polynomy pro výpočet jejich charakteristik. Méně se používají termočlánky podle normy DIN 43710. Je nutné dát pozor na to, že v normách jsou uvedeny základní hodnoty termoelektrického napětí pro vztažnou teplotu 0 °C. V praxi se ale obvykle používají jiné srovnávací teploty (v termostatech srovnávacích spojů), jako např. 20 ° a 50 °C, ale i třeba 70 °C a na tyto srovnávací teploty je nutné naměřené hodnoty termoelektrického napětí korigovat.

Zapojení termočlánků

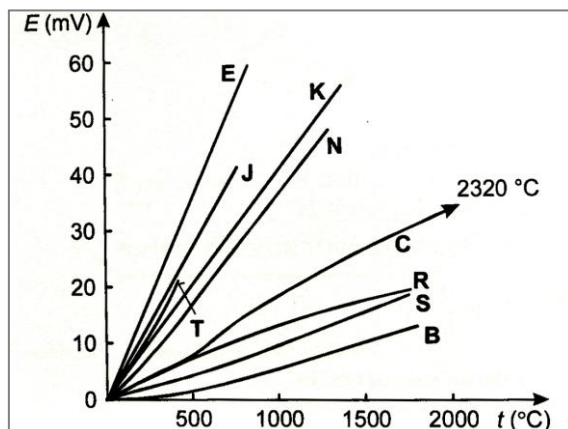


Obr. 6 Zapojení termočlánků

Korekce termoelektrického napětí

Termočlánek "K" (NiCr - Ni)

- měřená teplota 800 °C
- srovnávací teplota 20 °C (teplota studeného konce termočlánku)
- termoelektrické napětí při 800 °C, 33,277 mV
- termoelektrické napětí při 20 °C, 0,798 mV
- Výsledné termoelektrické napětí $33,277 - 0,798 = 32,479$ mV



Obr. 7 Použitelnost termočlánků

Vlastnosti a použitelnost termoelektrických článků

- Typ **K** (NiCr-NiAl) je vhodný pro oxidační a inertní atmosféru, je necitlivý pro neutronový tok, není vhodný pro měření ve vakuu.
- Typ **T** (Cu-CuNi) je nejlepší termoelektrický článek pro nízké teploty v redukční, oxidační a ve vakuu ho lze použít až do teploty 700 °C.
- Typ **J** (Fe-CuNi) je vhodný pro oxidační, redukční, inertní atmosféru i pro vakuum. V redukční atmosféře ho lze použít i bez ochranného krytí.
- Typ **N** (NiCrSi-NiSiMg) má velmi stabilní charakteristiku až do 1300 °C, je vhodný pro cyklické změny teploty a pro jadernou energetiku, neboť je odolný vůči neutronovému toku.
- Typ **E** (NiCr-CuNi) má největší hodnotu termoelektrického koeficientu je vhodný pro vakuum a pro středně oxidační atmosféru, kde se dá využít i bez ochranného krytí.
- Typ **R** (PtRh13-Pt) je používán pro měření vysokých teplot až do 1780 °C, je odolný vůči oxidaci i korozi, ale vždy musí být v ochranném provedení.
- Typ **S** (PtRh10-Pt) stejně, jako typ **R**.
- Typ **B** (PtRh30-PtRh6) je použitelný až od teploty 100 °C v rozsahu okolo 300 °C má velmi malou citlivost, chemicky má stejné vlastnosti jako **R** a **S**, ale při teplotách nad 1200 °C je stabilnější.
- Typ **G** (W-WRh) je vhodný pro extrémně vysoké teploty, obvykle se nepoužívá pod teplotu 400 °C a je vhodný a chemicky stabilní v oxidační, inertní atmosféře i ve vakuu a vodíku.
- Typ **C** (WRh5-WRh26) obdobně jako **G**.

Konstrukce termoelektrických článků

- **Drátové termoelektrické články**

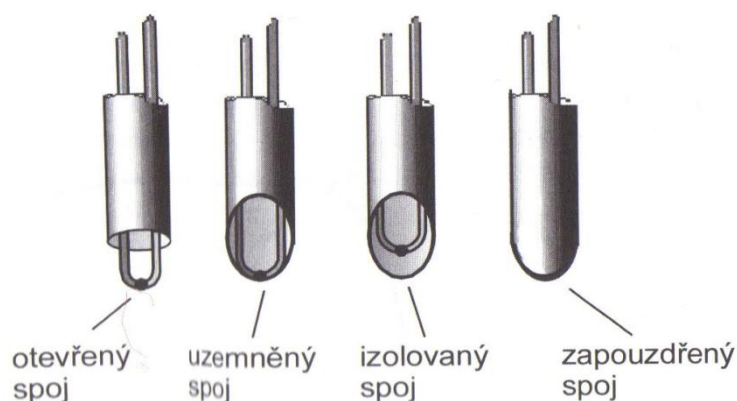
Jsou tvořeny dvěma kovovými větvemi, které jsou uloženy v izolačních trubkách. Materiálem těchto izolačních trubiček může být podle rozsahu provozních teplot plast, sklo, keramika atd. Průměr termoelektrických vodičů je od 0,5 mm do 3,5 mm. Obvykle se používají keramické trubičky (dvoukapiláry, čtyřkapiláry). Konstrukční uspořádání se člení na snímače do jímky, s jímkou, bez jímky, tyčové, sondy k měřicím přístrojům, speciální sondy.

- **Plášťové termoelektrické články**

Mají termoelektrické vodiče uloženy v kovovém plášti ve tvaru trubky. Vodiče jsou v plášti izolovány zhutnělou práškovou minerální izolací z MgO nebo Al₂O₃. Vnější průměr pláště se vyrábí v rozsahu od 0,1 mm do 8 mm. Plášť je z korozi-vzdorných (popř. žáruvzdorných) ocelí, z chromniklových slitin (Inconel, Incoloy, Hastelloy, Nicrobell), nebo i ze slitiny PtRh10 pro vysoké teploty vyrábí se až do délky 200 m.

Provedení se dělí:

- Izolované - Chrání termoelektrický spoj proti vlivům prostředí a navíc lze vhodným zapojením potlačit vliv elektromagnetických rušení a zemních smyček. Má nejdelší dobu odezvy.
- Uzemněné - Měřicí spoj termočlánků je přímo zavařený do dna pláště termočlánku, takže přímé chemické ani mechanické působení na spoj zde není vyloučeno. Má kratší odezvu, než izolované provedení.
- Otevřené - Měřicí spoj termočlánekových větví je svařen vně pláště a plášť plášťového termočlánku není na měřicím konci uzavřen, je nepoužitelné pro agresivní a vlhké prostředí. Nejrychlejší odezva.

**Obr. 8 Provedení termočlánků****Mezi specifické vlastnosti plášťových termočlánků patří například:**

1. Velká mechanická odolnost (proti tlaku, rázům, vibracím)
ohebnost stonku plášťového termočlánku (minimální poloměr ohybu je $5 \times D$, kde D je vnější průměr pláště)
2. Výborná ohebnost a malé rozměry
3. Možnost měření při vysokých tlacích i ve vakuu
4. Odolnost proti vlhkosti, různým plynům a chemikáliím
v závislosti na použitém materiálu pláště velká odolnost proti chemickým vlivům měřeného prostředí
5. Rychlá reakce na změny teploty měřeného prostředí
6. Vysoký izolační odpor při normální i vysoké teplotě
7. Větší stabilita výstupního signálu proti drátovým termočlámkům
8. Odstínění elektromagnetických rušivých polí u provedení s izolovaným provedením měřicího konce
9. Odolnost proti rychlým změnám teploty
10. Také bodové měření s plášťovými termočlámkami malých průměrů
11. Malá tepelná kapacita

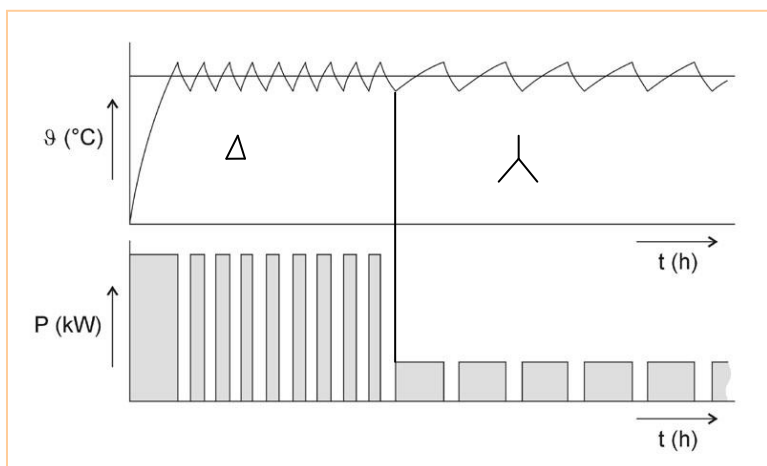
V kapitole 2.1 byla použita literatura [6],[8] a [9].

2.2 Regulace elektrických odporových pecí

Regulace teploty

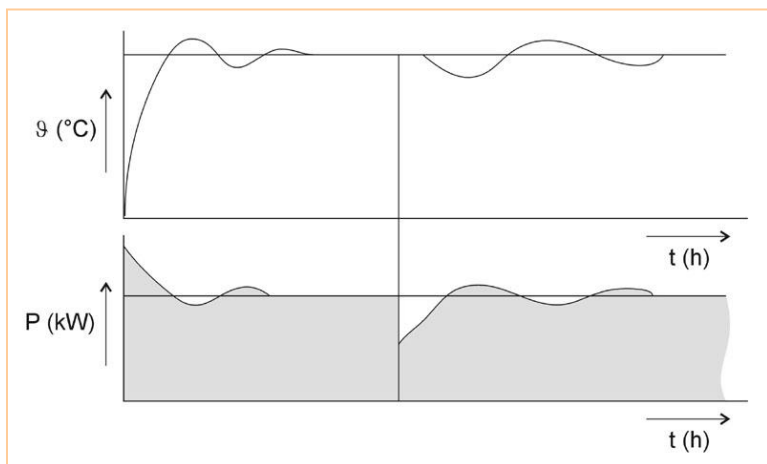
V průmyslu se užívá regulace plynulá nebo skoková. Skoková regulace (Obr. 9) teploty se dosáhne nejjednodušeji vypínáním a zapínáním celého příkonu pece. Dále můžeme využít přepínáním odporových sekcí hvězda trojúhelník, nebo přepínáním skupin odporových článků.

Úkolem regulace teploty v odporové peci je trvale udržovat požadovanou teplotu v pracovním prostoru, nebo reagovat na změny podle předem připraveného programu pece.



Obr. 9 Průběh teploty a příkonu při jedno a dvou pólové regulaci

Pro plynulou regulaci příkonu elektrické odporové pece, používáme polovodičových prvků, zapojených v přívodu k peci.



Obr. 10 Průběh teploty a příkonu při plynulé regulaci

Souhrn požadavků na řízení je možno shrnout takto:

- Řídicím signálem nesmí být přetěžována řídicí elektroda tyristoru, aby nedošlo ke ztrátě blokovací a závěrné schopnosti tyristoru.
- Řídicí signál musí mít potřebnou šířku; jeho hodnotu ovlivňuje zejména druh zátěže; kratší impulsy musí mít větší amplitudu
- Řídicí signál musí mít potřebnou strmost nárůstu, protože malá strmost snižuje i strmost nárůstu proudu.

Využitím této plynulé regulace dochází u odporové pece k výraznému zrovnoměnění teplotního průběhu.

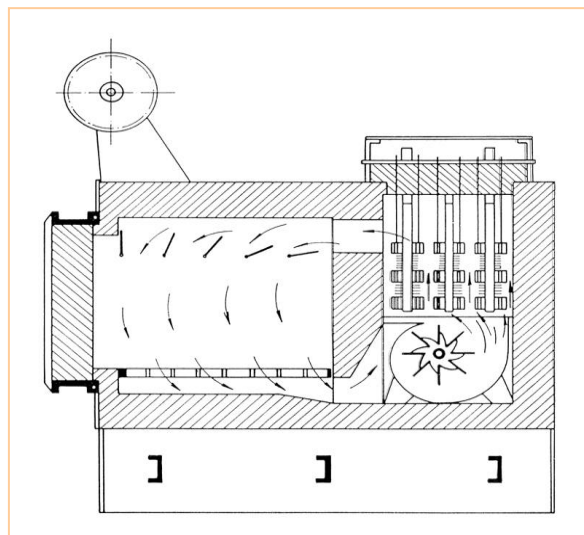
Rovnoměrnost teploty uvnitř odporových pecí

Pro některé speciální technologie tepelného zpracování či jiné procesy je zapotřebí docílit největší rovnoměrnosti a přesnosti rozložení teplot v pracovním prostoru pecí (méně než ± 5 °C). Pro takové účely mají např. více samoregulovatelných pásem (zón), některé i s regulovatelnými chladiči, mají ventilátory apod.

Pro dosažení rovnoměrnosti teploty se u pecí provádějí tato základní opatření:

- 1) Dokonalá tepelná izolace celé pece proti tepelným ztrátám, zejména utěsnění dveří apod.
- 2) Co nejúčelnější rozmístění topných článků v pecích, často nejen na stěnách ale i ve stropě, dně i dveřích.
- 3) Dokonalá a citlivá regulace skupin topných článků.
- 4) Ventilátory ve vnitřním prostoru pece pro cirkulaci atmosféry (zrovnoměňuje rozložení teplot, ale i urychluje ohřev vsázky zvýšeným přestupem tepla prouděním) jsou obvykle na stropě, u šachtových pecí ve dně i víku. Ventilátory jsou speciální konstrukce, ze žáruvzdorné oceli s motorem vně pece. Prodloužený hřídel motoru zasahuje do pece a nese vlastní ventilátor.
- 5) Pro usměrnění toku atmosféry při chodu ventilátoru v peci umísťují tvz. oběhové vložky nebo nastavitelné klapky.
- 6) Proti lokálnímu přehřátí vsázky sáláním od topných článků se používají kovové clony – stínění. Stínící a zároveň i oběhová vložka se používá u pecí šachtových, zvonových apod.

- 7) Kaloriferové topení – (Obr. 11) Rovnoměrný ohřev atmosféry (na 400 °C až 600 °C) přes roztopené topné články. U pecí s nepohyblivou vsázkou bývají v oddělené komoře, obíhající atmosféra nesmí být znečištěna tuhými nečistotami, které by mohli mechanicky narušit topné články.
- 8) Kusovou vsázkou je třeba rozmístit pokud možno v peci tak, aby každý jednotlivý kus mohl být atmosférou obtékán.



Obr. 11 Pec s kaloriferovým topením

V kapitole 2.2 byla použita literatura [2] a [8].

3 Výpočet doby ohřevu

3.1 Výpočet doby ohřevu

Teplu se do vsázky přenáší hlavně prouděním (konvencí) a sáláním. Z malé části i vedením, a to pouze na počátku ohřevu a stykem vsázky s ohřátou podlahou, dopravním pásem apod. Proto obvykle vedení tepla zanedbáváme, což představuje určitou rezervu.

Pro přenos tepla prouděním platí podle Newtonova zákona vztah:

$$P_U = \alpha A (\vartheta - \vartheta') \quad (3.1.1)$$

P_U Užitečný tepelný výkon přenášený do vsázky povrchem A (W)
 α Výsledný součinitel přestupu tepla z pece do vsázky ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k \quad (3.1.2)$$

α_k Součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci) ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

α_s	Součinitel přestupu tepla sáláním (radiací)	(Wm ⁻² K ⁻¹)
ϑ	Teplota pece	(K)
ϑ'	Teplota vsázky	(K)

Střední hodnota součinitele α_K je u peci bez nuceného oběhu atmosféry přibližně 15 Wm⁻²K⁻¹

Potom platí:

$$\alpha = 15 + \alpha_s \quad (3.1.3)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním v určitém menším rozsahu hodnot ϑ (Θ) a ϑ' (Θ')

$$\alpha_s = \frac{\sigma_c \cdot \varepsilon \left(\left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta'}{100} \right)^4 \right)}{\vartheta - \vartheta'} \quad (3.1.4)$$

σ_c Boltzmannova konstanta,

$$\sigma_c = 5,674 \left(W \cdot m^{-2} \cdot \left(\frac{K}{100} \right)^{-4} \right)$$

ε	Emisivita materiálu (stupeň černosti vsázky $\varepsilon=0,8$ až $0,9$)	
Θ	Teplota v komoře pece	(K)
Θ'	Teplota vsázky	(K)
ϑ	Teplota v komoře pece	(K)
ϑ'	Teplota vsázky pece	(K)

Povrchem A přijímá vsázka teplo. Tento povrch tvoří podle umístění v peci a podle vzájemného „stínění“ kusů vsázky jen část celkového povrchu A_v vsázky.

$$A = k_v \cdot A_v \quad (3.1.5)$$

k_v redukční činitel $k_v < 1$, určuje se obvykle podle praktických zkušeností

Při výpočtu dále předpokládáme, že vsázka je „tepelně tenká“. U takové vsázky teplota vnitřku vsázky sleduje teplotu jiného povrchu téměř bez časového zpoždění. V každém časovém okamžiku lze vsázku posuzovat jako rovnoměrně prohřátou. Pro tepelně tenkou vsázku platí:

$$Bi < 0,25$$

$$Bi = \frac{\alpha s}{2\lambda} \quad (3.1.6)$$

Bi je Biotovo podobnostní kritérium

s je reprezentativní tloušťka stěny vsázky, určující její „masívnost“ (může to být největší tloušťka u rovinné vsázky, nebo největší průměr válcové vsázky)

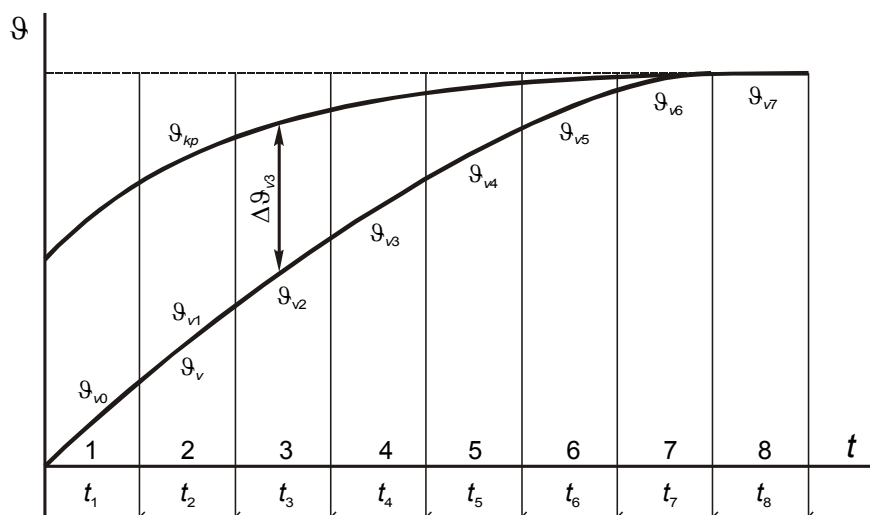
α	Součinitel přestupu tepla	(Wm ⁻² K ⁻¹)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)

V kapitole 3.1 byla použita literatura [2], [5] a [8].

3.2 Výpočet doby ohřevu vsázky v elektrické odporové peci se stabilní vsázkou

Výpočet je založen na graficko-početním iteračním způsobu (výpočet po krocích).

Je zadána teplota v peci jako funkce času během pracovního cyklu $\vartheta_{KP}=f(t)$ a máme určit oteplovací křivku vsázky $\vartheta_{V3}=f(t)$.



Obr. 12 Teplotní křivky pece a vsázky

Postup výpočtu:

Máme zadanou teplotní křivku pece $\vartheta_{KP}=f(t)$ např. podle Obr. 12. Na ose času zvolíme časové intervaly (kroky), jejich hustota je závislá na požadované přesnosti výpočtu. Obvykle se volí časové intervaly t_1, t_2, \dots, t_n stejně dlouhé. Křivku průběhu teploty vsázky počítáme a kreslíme postupně. Začínáme s ϑ_{v0} a počítáme ϑ_{v1} , potom z určené teploty ϑ_{v1} určíme teplotu ϑ_{v2} atd.

Např. pro třetí krok platí (interval t_3)

$$\alpha_3 \cdot S \cdot \Delta \vartheta_3 \cdot t_3 = m \cdot c_3 (\vartheta_{v3} - \vartheta_{v2}) \quad (3.2.1)$$

Teplotu ϑ_{v3} musíme ovšem zatím určit extrapolací křivky $\vartheta_v=f(t)$, na základě již vypočítaného průběhu této křivky v krocích předchozích. Následnými úpravami dojdeme, až k hledané teplotě ϑ_{v3} pro kterou platí:

$$\vartheta_{v3} = \frac{\frac{1}{2} \alpha_3 S_v t_3 (\vartheta_{kp2} - \vartheta_{v2} + \vartheta_{kp3}) + m_v c_3 \vartheta_{v2}}{\frac{1}{2} \alpha_3 S_v t_3 + m_v c_3} \quad (3.2.2)$$

Pro i -tý časový interval t_i je teplota vsázky určena následovně:

$$\vartheta_{vi} = \frac{\frac{1}{2} \alpha_i S_v t_i (\vartheta_{kp(i-1)} - \vartheta_{v(i-1)} + \vartheta_{kpi}) + m_v c_i \vartheta_{v(i-1)}}{\frac{1}{2} \alpha_i S_v t_i + m_v c_i} \quad (3.2.3)$$

c_i	vlastní měrná tepelná kapacita	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
ϑ_{kp}	teplota v komoře pece	(°C)
ϑ_v	teplota vsázky pece	(°C)
α	součinitel přestupu tepla z pece do vsázky	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
S	část povrchu celkové vsázky přes kterou je přijímáno teplo	(m ²)
m_v	hmotnost vsázky	(Kg)
t_i	čas intervalu	(s)

Pro celkovou dobu ohřevu platí:

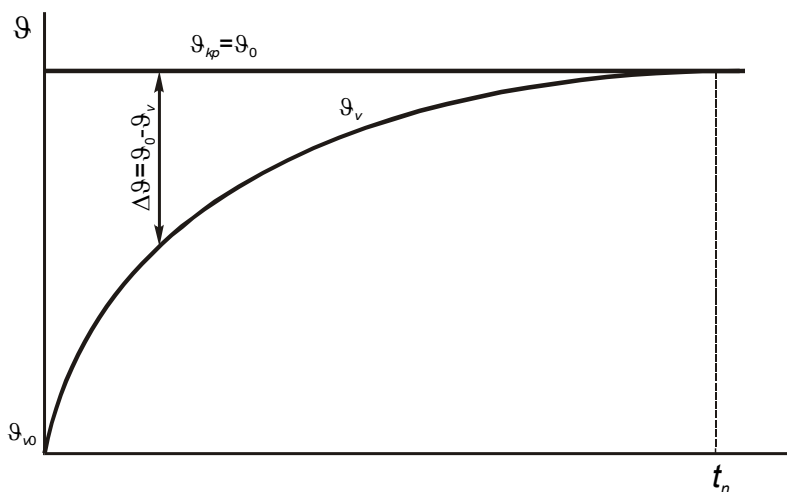
$$t_n = \sum_{i=1}^{i=N} t_i \quad (3.2.4)$$

N požadované číslo posledního intervalu

3.2.1 Přibližný rychlý způsob výpočtu doby ohřevu tenké vsázky

Výpočet vychází z těchto předpokladů:

1. Teplota v peci po celou dobu ohřevu vždy konstantní.
2. Teplota vsázky stoupá podle paraboly $t = k \cdot \vartheta_v^2$.
3. α je konstantní po celou dobu ohřevu.



Obr. 13 Ohřev vsázky $t = k \cdot \vartheta_v^2$

Platí:

$$\alpha \cdot S (\vartheta_0 - \vartheta_v) dt = m \cdot c \cdot d\vartheta_v \quad (3.2.1.1)$$

Rozdíl teplot se mění v intervalu $\Delta \vartheta = \vartheta_0 - \vartheta_v$. Pro parabolický průběh teploty určíme střední hodnotu rozdílů teplot, kterou dosadíme do rovnice (3.2.1.1) a s přihlédnutím, že $\vartheta_{vk} = \vartheta_0$ získáme:

Doba ohřevu t_n :

$$t_n = \frac{3m_v c (\vartheta_{vk} - \vartheta_{v0})}{\alpha \cdot S (\vartheta_0 - \vartheta_{v0})} \quad (3.2.1.2)$$

c	vlastní měrná tepelná kapacita	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
ϑ_{vk}	koncová teplota vsázky	(°C)
ϑ_{v0}	počáteční teplota v peci	(°C)
S	část povrchu celkové vsázky přes, kterou je přijímáno teplo	(m ²)
m_v	hmotnost vsázky	(Kg)
ϑ_0	teplota v peci (konst.)	(°C)

V kapitole v 3.2 byla použita literatura [2], [5] a [8].

4 Popis použitých přístrojů

4.1 Popis muflové pece

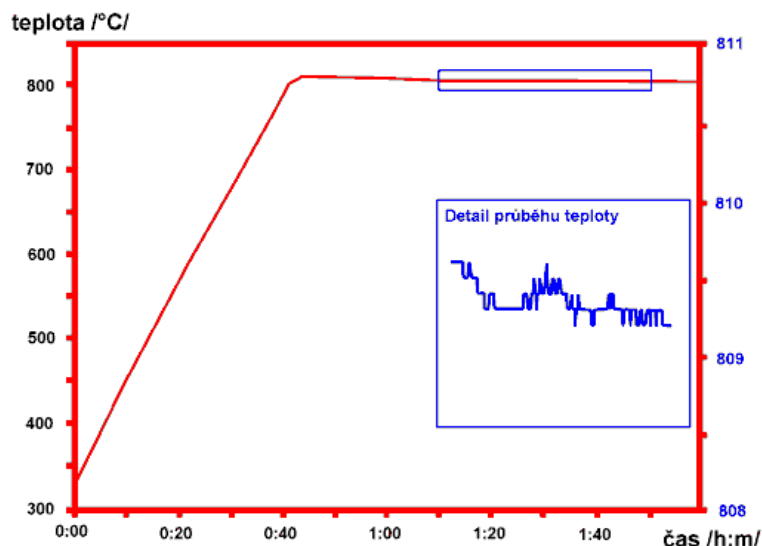
Pec MP05-0.1 má plášť z ocelového plechu. Skládá se ze dvou částí spojených šrouby. Ve spodní části pláště je umístěno ovládání a řízení pece, v horní části je keramická mufle s topným vinutím a tepelnou izolací. Teplotu v peci snímá termočlánek NiCr-Ni (typ K) a řídí programovatelný regulátor pomocí výkonového stupně s triakem spínaným v nule. Topné vinutí je připojeno přes kontakt stykače. Cívka stykače je také ovládána dveřním spínačem a ochranným obvodem regulátoru. Připojení k napětí v rozvodné síti je přes zásuvku 16A gumovým kabelem CXGSG 3x1,5 mm²



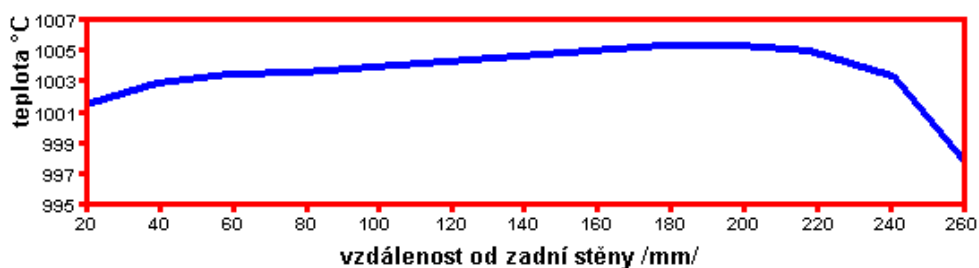
Obr. 14 Muflová pec MP05-0.1

Technické parametry pece

Napájení	230 V, 50 Hz
Příkon	2 kW
Provozní teplota	max. 1100 °C
Ochranná teplota	1100 °C
Počet nastavitelných programů	20
Počet úseků v programu	20
Doba trvání jednoho úseku	max. 9999 minut
Odezva regulace	2,56 s
Rozlišovací schopnost	0,1 °C
Rozměry pece /v-š-h/	490-400-525 mm
Pracovní prostor mufle /v-š-h/	95-170-290 mm
Váha	27 kg



Obr. 15 Nárůst teploty MP05-0.1



Obr. 16 Průběh teplotního pole v komoře pece

Obsluha regulátoru

Obrázek ukazuje pohled na ovládání regulátoru. Přední panel sdružuje indikační a ovládací prvky regulátoru. Je zde jednořádkový displej, pod ním jsou tři signalizační diody. Zelená- vlevo signalizuje sepnutí hlavního vypínače na peci. Prostřední červená signalizuje chybné zadání údaje nebo poruchu. Dioda vpravo- žlutá indikuje sepnutí regulačního výstupu (topí, netopí). Ostatní prvky na panelu regulátoru jsou tlačítka membránové klávesnice a jejich význam je na první pohled patrný. Tlačítka na regulátoru jsou rozlišena barvou. Zelenomodrá tlačítka slouží k zadávání hodnot, kdežto červená tlačítka jsou ovládací. Dvě tlačítka jsou kombinovaná.



Obr. 17 Regulátor muflové pece

Pec je vybavena programovatelným regulátorem DR 20

Počet programů: 20, počet kroků programu: 20.

Nastavení programu: pro teplotu po 1 °C pro čas po 1 min. (do 32 000 min.).

Vstup regulátoru: termočlánek K.

Každý program ukončen ochrannou teplotou.

Ochranná teplota pro všechny programy (alarm).

Regulátor řídí výkonovou spínací jednotku 16 A s ochranným stupněm.

Po zapnutí pece můžeme vybírat z těchto položek:

1)Start – Zapne se vybraný program.

2)Vyber program – Můžeme vybírat z již nastavených programů.

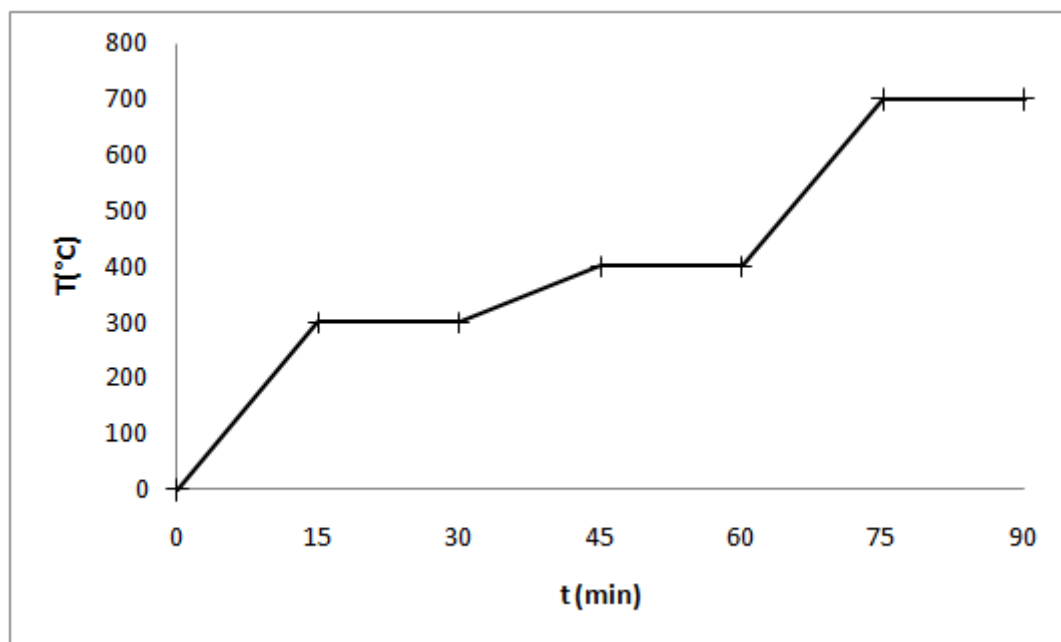
3)Nastav program – Možnost vytvoření nového teplotního programu.

4)Informace – Zobrazí informace o peci (čas provozu, typ regulátoru, v.r.č. pece)

5)Heslo - Zde je možnost nastavit pec tak, aby obsluha měla možnost jen spouštět, již nastavenou regulaci, přičemž teplotní průběh může nastavit je technolog nebo pracovník zodpovědný za provoz pece.

Nastavení programu pece

Regulátor umožňuje vytvořit teplotní program až o dvaceti úsecích, přičemž jedním úsekem rozumíme časovou vzdálenost mezi dvěma teplotami, ať už jde o vzrůst, pokles, nebo výdrž teploty.



Obr. 18 Příklad teplotního programu

Na tomto obrázku, vidíme jednoduché nastavení programu pece. Nárůst teploty na 300 °C za 15 minut zde výdrž dalších 15 minut, další nárůst na teplotu 400 °C (15 min), opět výdrž teploty 15 minut atd.

Na svislou osu jsme vynesli teplotu ve stupních, na vodorovnou osu čas v minutách, v těchto jednotkách se tyto veličiny do regulátoru zadávají.

Na displeji vidíme

1	START	25.1°C
---	-------	--------

Šípkou najedeme na

3	NASTAV PROGRAM
---	----------------

Na začátku každého teplotního programu zadáváme tzv. maximální teplotu, jde o to, že tuto teplotu nechceme za žádných okolností překročit (z technologických důvodů). Tuto teplotu je potřeba zadávat vždy cca o 9 °C větší než nejvyšší teplotu v programu. A to proto, že při požadovaném rychlém nárůstu teploty dochází k určitému minimálnímu překmitu teploty. Zvláště při zadávání nízkých teplot v rozmezí 150÷400 °C a rychlém nárůstu teploty 5÷20 min, dojde k velkému překmitu teploty třeba až na 175 °C při zadaných 150 °C, proto musíme zvýšit max. teplotu, nebo pokud potřebujeme malý (žádný) překmit teploty nastavíme tuto teplotu do dvou kroků.

Např. pro nárůst teploty na 300 °C za dobu 10 minut nastavíme:

1.teplota 240 °C, 1.čas 5 min

2.teplota 300 °C, 2.čas 5 min

Max. teplota může být 330 °C. Po zadání max. teploty stiskneme enter a na displeji vidíme

1	SIGNAL VYPNUT
---	---------------

Zde máme tři možnosti výběru. Signál vypnut (zapnut, 1min.) – akustická signalizace. Po zvolení signalizace, se na displeji objeví.

1	TEPLOTA=	0
---	----------	---

Znamená to, že budeme nastavovat první teplotu, ENT potvrdíme. Tím je teplota zadána a na displeji se objeví:

1	CAS	=	0
---	-----	---	---

Zadáme potřebný čas úseku a potvrdíme ENT. Na displeji se nám objeví zadávání druhého úseku (teplota, čas) atd., až na požadovaný průběh teploty (max. 20).

Můžeme nastavit až 20 teplotních úseků, které jsou trvale uloženy v paměti regulátoru a my pouze zvolením čísla programu 1÷20 aktivujeme příslušný teplotní program.

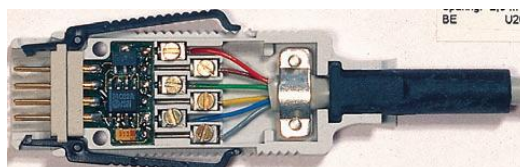
V kapitole 4.1 byla použita literatura [10], [11] a [12].

4.2 Popis měřicího přístroje ALMEMO



Měřicí přístroj almemo technické parametry:

- Ruční kontrolní měřicí přístroj s dvěma měřicími vstupy.
- 8 ½-místný LCD displej, 12mm.
- Pět funkčních tlačítek: Měřicí bod výběr, Měřené hodnoty max. a min., funkce hold a funkce clear.
- Mimořádně snadná manipulace, naprogramování senzorů je uloženo v inteligentních ALMEMO konektorech, přístroj automaticky rozpozná senzor a ukáže naměřenou hodnotu na displeji spolu ve vhodných jednotkách.
- Napájení 9V akumulátor s nabíječkou.



Obr. 19 Měřicí přístroj almemo

Inteligentní Almemo konektory jsou patentovány a zahrnují v sobě paměť EEPROM, kde jsou uloženy parametry senzorů. Všechny senzory naprogramované uživatelem mohou být vyměněny bez provádění změn v nastavení. Po připojení konektoru měřicí přístroj automaticky změní nastavení podle zapojeného přístroje.

V kapitole 4.2 byla použita literatura [13].

4.3 Použité termočlánky

Pro měření jsem měl k dispozici tři termočlánky typu K. Jeden termočlánek umístěný v peci (Obr. 20) a slouží pro měření a regulaci teploty v peci, vlastním regulátorem DR20. Zbylé dva termočlánky jsou připojeny k měřicímu přístroji almemo, jeden snímá teplotu v komoře pece (Obr. 20), kde je trvale uložen, a poslední termočlánek (Obr. 22) se kterým je možno manipulovat snímá teplotu vzorku, tyto teploty jsou přes sériové rozhraní zaznamenány v PC. Pomocí programu PEC.



Obr. 20 Pracovní prostor pece (umístění termočlánků)



Obr. 21 Termočlánek pro snímání teploty vzorku

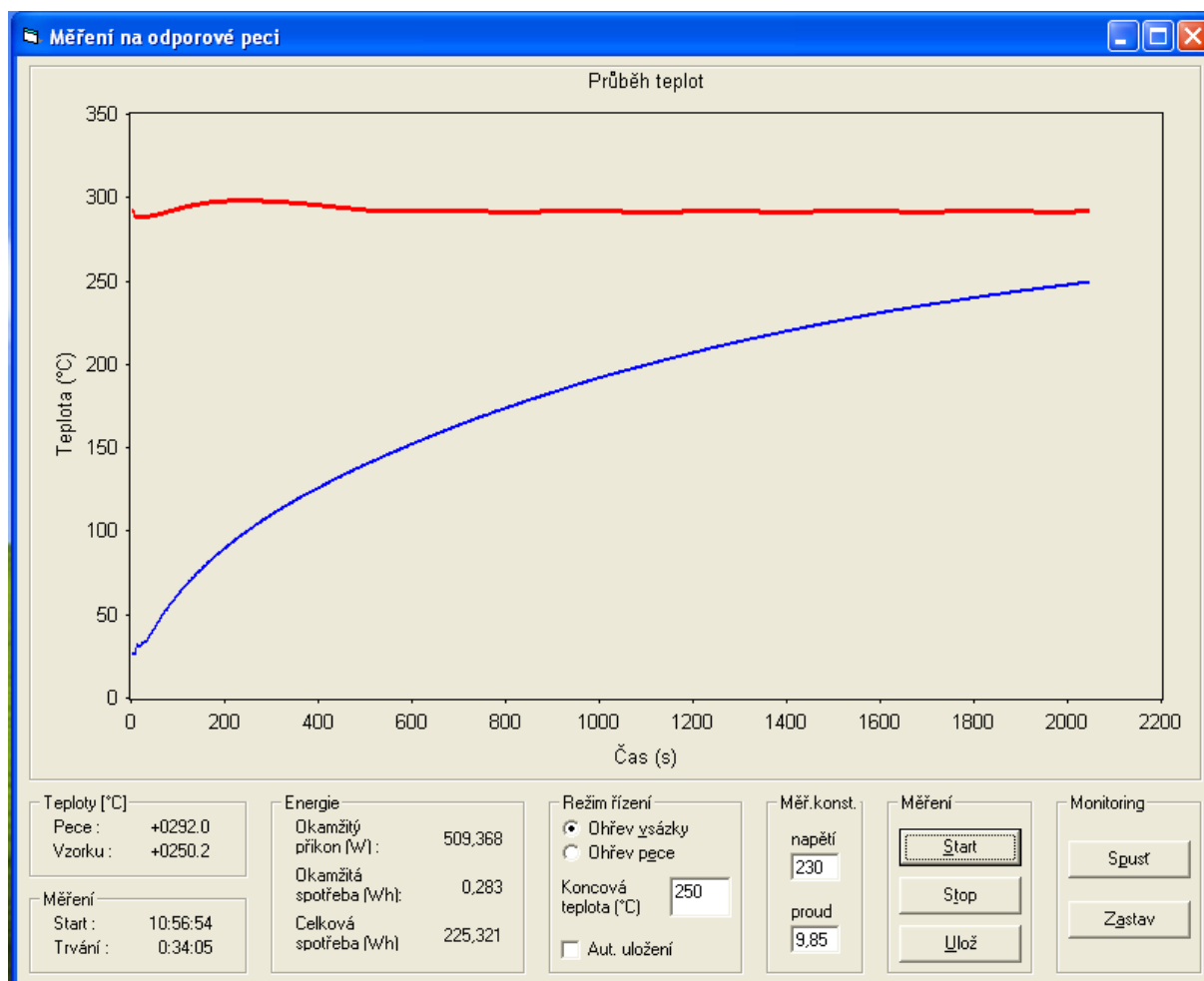


Obr. 22 Vstup pro termočlánek

4.4 Program PEC

Po spuštění programu je nutno zadat převodní konstanty převodníků napětí a proudu. Po spuštění monitoringu jsou snímány a zobrazovány teploty v peci a vzorku, okamžitý příkon a spotřeba. Následuje volba režimu - ohřev pece nebo vzorku a zadá se požadovaná koncová teplota. Po startu měření se přidá grafické zobrazení průběhu teplot a celková spotřeba energie. Po dosažení koncové teploty se měření ukončí. Při zaškrtnutí volby automatického uložení dojde zároveň k uložení naměřených a vypočtených hodnot do souboru, v opačném případě je nutno data uložit stiskem tlačítka „Ulož“.

Pracovní prostředí programu:



Jádrem programu je měřicí část. Ta musí obsluhovat ve vzájemné součinnosti obě měřicí zařízení - kartu pro měření napětí a proudu a měřič teploty Almeco. Časování vychází jednak z rychlosti změn teplot v čase, jednak z možností jeho měřidla. To je koncipováno tak, že měřené hodnoty vysílá na sériové rozhraní v intervalu cca 2 s. Tato doba je zároveň plně postačující z hlediska zachycení rychlosti její změny, neboť při ohřevu vsázky se teplota v tomto intervalu mění v řádu desetin °C, což je zároveň rozlišení uvedeného měřidla.

Vzorkování napětí a proudu vychází z předpokladu, že je nutno korektně navzorkovat střídavý průběh napětí síťového kmitočtu 50 Hz. Vzorkovací kmitočet byl proto s dostatečnou rezervou zvolen 1 kHz na kanál. Vzhledem k tomu, že odporová pec představuje čistě činnou zátěž, činný výkon je pak vypočten prostým vynásobením pravých efektivních hodnot napětí a proudu.

Hodnoty napětí a proudu jsou kontinuálně zaznamenávány do kruhové vyrovnávací paměti. Její vyčítání je odvozeno od okamžiku ukončení přenosu měření teplot (0,5 Hz). Přibližně každé 2 sekundy je tedy odečtena dvojice teplot komora pece - vsázka a vypočten okamžitý příkon. S tímto časovým krokem se rovněž aktualizuje graf a údaje o spotřebě okamžité a celkové.

Program PEC, tedy zaznamenává u_{OK} , i_{OK} , T_P a T_{VZ} , a z okamžitých hodnot počítá následující veličiny:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n u_k^2}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n i_k^2}$$

$$P_{ok} = S_{ok} = U_{ej} \cdot I_{ef}$$

$$W_{ok} = P_{ok} \cdot \frac{t_n}{3600}$$

$$W_{celk} = \sum_{k=1}^n W_{ok}$$

V kapitole 4.4 byla použita literatura [7].

Dále byly použity tyto přístroje:

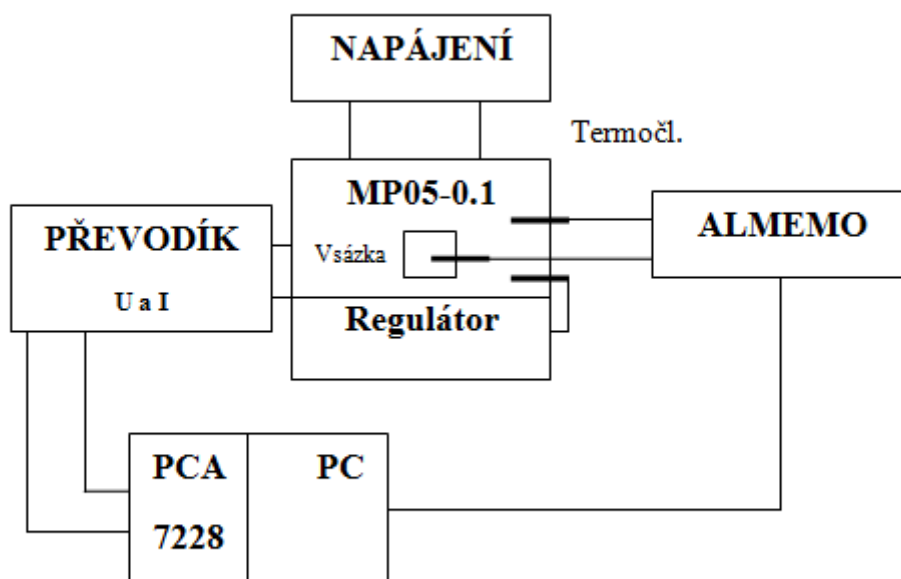
4. Měřicí karta PCA7228
5. Klešťový ampérmetr Chauvin Arnoux C30



Obr. 23 PCA 7228

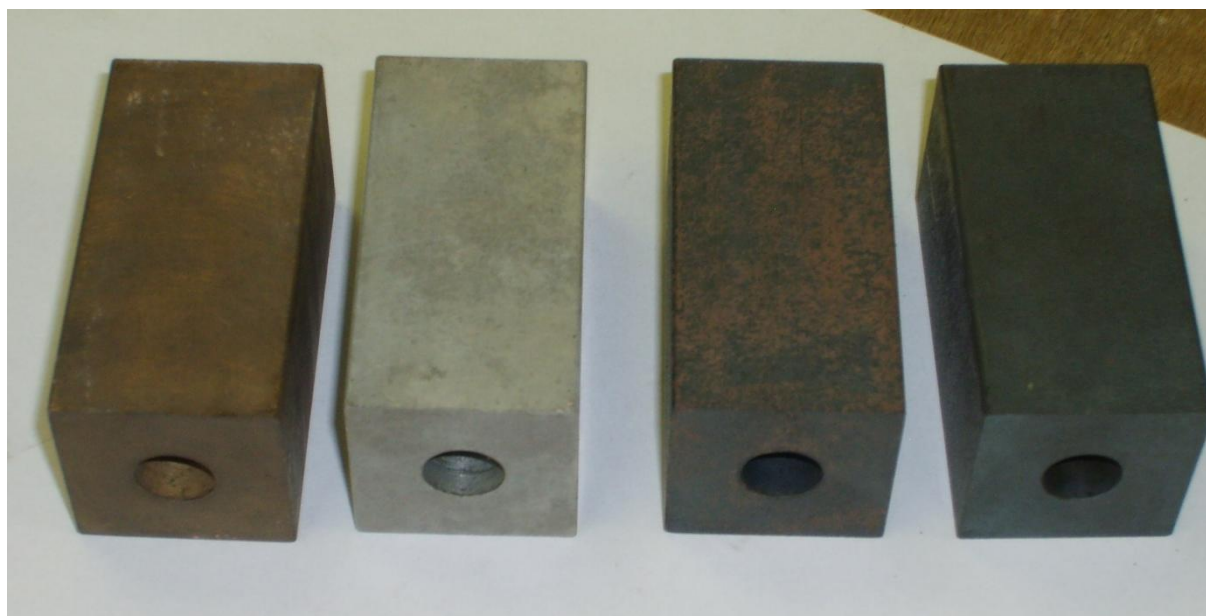
5 Měření na muflové peci MP05-0.1

Schéma zapojení

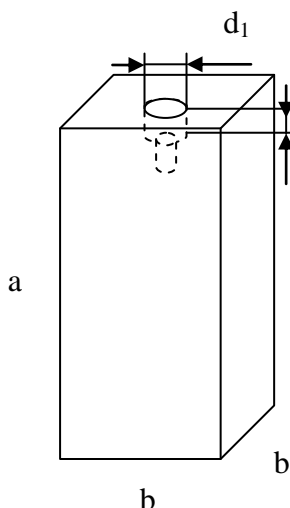


Měřené vzorky:

- a) Měď
- b) Dural
- c) Mosaz
- d) Železo



Obr. 24 Zleva a) Měď, b) Dural, c) Mosaz, d) Železo

Profil

Rozměry:

$$a = 0,07 \text{ m}$$

$$b = 0,035 \text{ m}$$

Otvor pro termočlánek:

$$d_1 = 0,012 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,02 \text{ m}$$

$$d_2 = 0,006 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,015 \text{ m}$$

Umístění vzorků v peci

Na dno pece je umístěna šamotová podložka, je to doporučeno výrobcem pece a prodlouží to její životnost. Na tuto podložku je umístěna vodící kovová podložka, která slouží tomu, aby měřený vzorek byl na požadovaném místě a do vyvrtaného otvoru se dal vsunout termočlánek měřící teplotu vzorku. Vše je patrné z Obr. 20.

Postup měření

K dispozici jsem měl 4 vzorky (dural, železo, měď a mosaz) konečná teplota vzorku byla o 50 °C menší než konečná teplota pece. Teploty pece byly (300 °C, 400 °C, 500 °C). Toto měření jsem opakoval 3x pro každou hodnotu teploty pece.

Nejprve jsem rozehrál pec na požadovanou teplotu (300 °C, 400 °C, 500 °C), počkal jsem, až dojde ke stabilizaci pece (hodnotě příkonu pece), což nastávalo v čase cca 1:30:00. Poté jsem vložil ohříváný vzorek a do něj umístil termočlánek, který snímal jeho teplotu. Program PEC, zaznamenal všechny potřebné hodnoty k vyhodnocování měření.

Prvním měřením jsem zjišťoval, ve kterém čase se pec stabilizuje, a ohřál jsem na teplotu 400 °C celou sadu vzorků, aby se stabilizovaly chemické vlastnosti.

6 Vyhodnocení měření

Výstupní hodnoty z programu PEC

Tento program ukládá výstupní hodnoty do poznámkového bloku ve formátu *název.txt*.

Př. Ohřev měděného vzorku konečná teplota vzorku 250 °C, teplota pece 300 °C.

Datum 18.3.2010

Start 10:17:43

Spotřeba energie (Wh) 176,007760737736

Index	Čas	Čas (s)	Tpece (°C)	Tvzorku (°C)	Příkon (W)	Energie okamžitá (Wh)	Energie průběžná (Wh)
1	0:00:00	0	284	126,8	2135,129441	1,186183023	1,186183
2	0:00:02	2	284,1	123,6	2137,226907	1,187348282	2,373531
3	0:00:04	4	284,3	119,7	2133,38368	1,185213156	3,558744
4	0:00:06	6	284,4	115,4	2132,601595	1,184778664	4,743523
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
877	0:29:13	1753	289,6	249,9	783,6144436	0,435341358	175,4472
878	0:29:15	1755	289,6	249,9	312,2527525	0,173473751	175,6207
879	0:29:17	1757	289,5	250	696,6782228	0,387043457	176,0078

6.1 Ztráty pece

Z naměřených hodnot jsem určil, ztráty pece. Měření jsem opakoval 3x pro každou konečnou hodnotu pece, v Tab. 1 jsem uvedl rozptyl hodnot (pro výpočet ztrát pece) po opakovaném měření. Střední hodnotu jsem si určil jako 100% a spočítal odchylky měření. Vstupní hodnoty pro Tab. 1 a Tab. 2 zaznamenal program PEC, je to ohřev a stabilizace prázdné pece, tyto hodnoty jsou přiloženy v elektronické příloze na CD. Hodnoty v ostatních tabulkách jsou s ohřevem určitého vzorku a jsou opět v elektronické příloze.

Měření č.	Tp 300 °C	Tp 400 °C	Tp 500 °C
1.	1,63%	1,55%	2,66%
2.	-0,12%	-1,60%	0%
3.	0%	0%	-0,31%

Tab. 1 Rozptyl měření

Určení ztrát pece

Teplota pece	$P_{Zprům.}$
[°C]	[W]
300	483,522
400	600,532
500	693,855

Tab. 2 Ztráty pece

Hodnoty jsou průměrovány, až od času kdy dojde k ustálení hodnoty příkonu. Na Obr. 25 vidíme, že k ustálení příkonu dochází od času cca 1:30:00.

Energie na pokrytí ztrát pece

Ztráty pece jsou přepočteny na energii, pro jednotlivé doby ohřevu vzorku podle vztahu

$$W = P \cdot \frac{t_{OHŘ}}{3600} \quad [Wh]$$

Tato energie bude potřebná pro určování energie potřebné pro ohřev vzorku.

Teplota pece	W_z Dural	W_z Měď	W_z Mosaz	W_z Železo
[°C]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]
300	188,564	198,553	253,490	209,760
400	308,940	274,577	328,791	274,243
500	346,043	273,870	334,110	290,614

Tab. 3 Energie spotřebovaná při ustálení pece**Příklad výpočtu** ($T_p = 300\text{ °C}$)

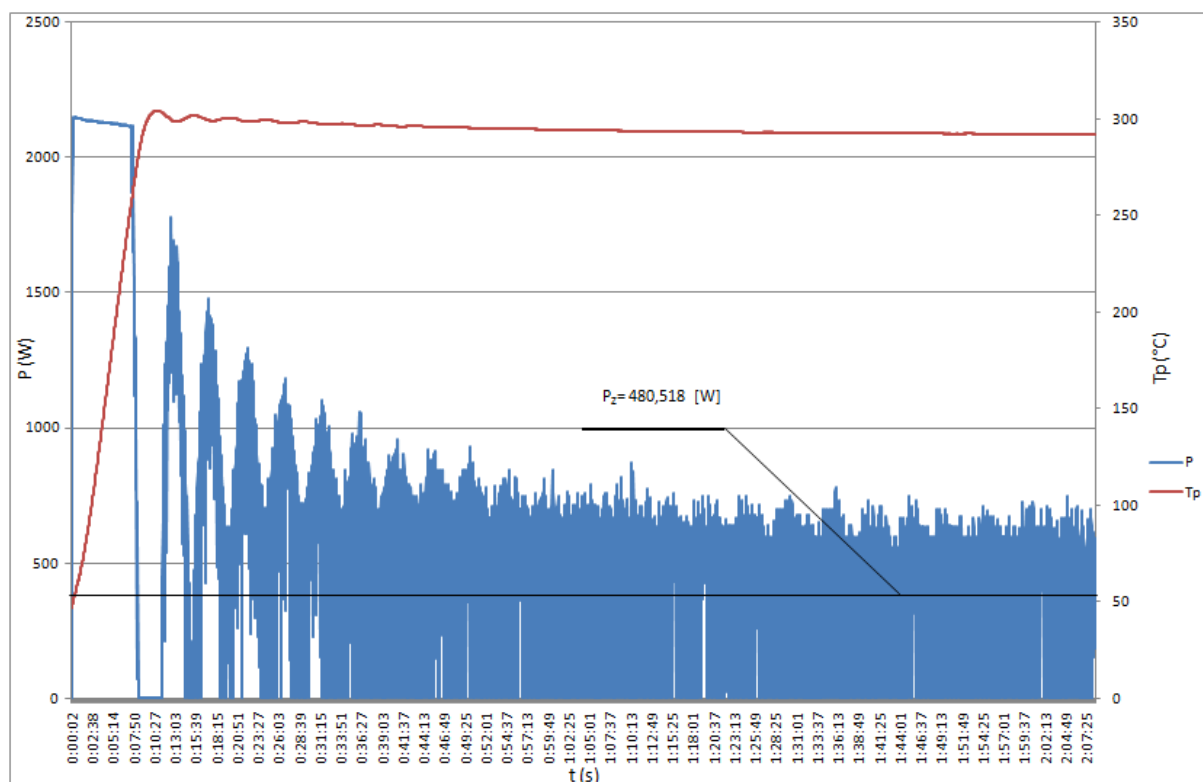
Měření č. 1. Průměrná hodnota příkonu (P_{Z1}) = 488,9514487 W

Měření č. 2. Průměrná hodnota příkonu (P_{Z2}) = 480,5175205 W

Měření č. 3. Průměrná hodnota příkonu (P_{Z3}) = 481,0977987 W

$$P_{Zprům} = \frac{\sum_{k=1}^{n=3} P_{Zn}}{n} = \frac{488,951 + 480,518 + 481,098}{3} = \underline{\underline{483,522W}}$$

$$W_z = P \cdot \frac{t_{OHŘ}}{3600} = 483,522 \cdot \frac{1548}{3600} = \underline{\underline{188,564Wh}}$$



Obr. 25 Závislost teploty pece a příkonu na čase ohřevu vzorku

Rozptyl naměřených hodnot při určování ztrát otevřením dveří a vkládáním vsázky

DURAL		
Měření č.	Teplota pece [°C]	Odchylka měření [%]
1.	300	-25,42
2.	300	3,99
3.	300	0
1.	400	0,84
2.	400	0
3.	400	-0,35
1.	500	0
2.	500	-1,74
3.	500	2,46

MĚŘ		
Měření č.	Teplota pece [°C]	Odchylka měření [%]
1.	300	-11,02
2.	300	7,72
3.	300	0
1.	400	-4,03
2.	400	0,40
3.	400	0
1.	500	-0,96
2.	500	0
3.	500	0,77

MOSAZ		
Měření č.	Teplota pece [°C]	Odchylka měření [%]
1.	300	-7,21
2.	300	20,28
3.	300	0
1.	400	0
2.	400	-1,12
3.	400	0,48
1.	500	-0,14
2.	500	0
3.	500	0,97

ŽELEZO		
Měření č.	Teplota pece [°C]	Odchylka měření [%]
1.	300	-19,20
2.	300	18,97
3.	300	0
1.	400	-4,30
2.	400	2,02
3.	400	0
1.	500	-1,21
2.	500	0,82
3.	500	0

Tab. 4 Rozptyl naměřených hodnot

Postup se provádí obdobně, jako u určování ztrát pece.

Z těchto tabulek vidíme, že největší odchylky hodnot byly u $T_p=300$ °C a to pro materiál dural měření č. 1. (-25,42%) a dále u mosazi měření č. 2. (20,28%), tyto hodnoty byly vyloučeny a pro vyhodnocení ztrát pece otevřením a vkládáním vzorků, nebyly použity.

Celkové ztráty pece při ohřevu vzorků

Je to průměrná hodnota příkonu pece, při ohřevu vzorku. Takže jsou v těchto ztrátách započítané i ztráty otevřením pece a vkládáním vzorků (Obr. 26).

Teplota pece	P_z Dural	P_z Měď	P_z Mosaz	P_z Železo	$P_{zprům.}$
[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
300	373,759	397,342	386,344	421,642	394,772
400	578,981	589,294	601,600	618,375	597,062
500	748,618	793,020	773,986	814,155	782,445

Tab. 5 Celkové ztráty při ohřevu vzorku

Příklad výpočtu pro dural ($T_p=300$ °C; $T_{vz}=250$ °C):

Měření č. 1. Hodnota P_z , byla zanedbána kvůli vysoké odchylce od opakovaných měření

Měření č. 2. Průměrná hodnota příkonu (P_z) = 352,7091 W

Měření č. 3. Průměrná hodnota příkonu (P_z) = 339,182 W

Celkové průměrné ztráty na ohřev vzorku Dural

$$P_{Zdural} = \frac{\sum_{k=1}^n P_n}{n} = \frac{352,7091 + 339,182}{2} = \underline{\underline{373,759W}}$$

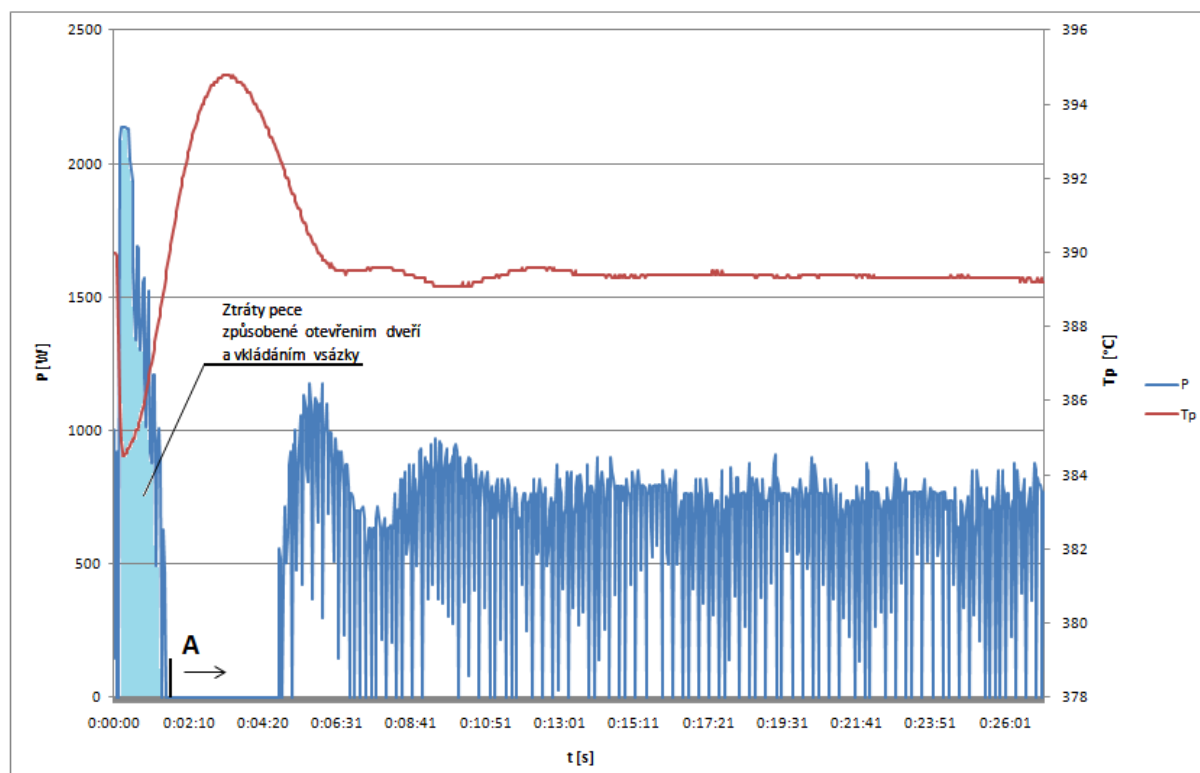
$P_{Zprům}$ je průměrná hodnota ztrát všech čtyř vzorků.

$$P_{Zprům} = \frac{P_{Zdural} + P_{Změm} + P_{Zmosaz} + P_{Zželezo}}{4} =$$

$$= \frac{373,759 + 397,342 + 386,344 + 421,642}{4} = \underline{\underline{394,772W}}$$

Ztráty pece otevřením dveří a vkládáním vsázky

Př. Ohřívání materiál měď ($T_p = 400\text{ °C}$; $T_{vz} = 350\text{ °C}$)



Obr. 26 Závislost teploty pece a příkonu na čase ohřevu vzorku

Tyto ztráty se nedají úplně eliminovat, ale dají se minimalizovat, stejným postupem při vkládání vsázky a poté se určí jejich přibližná hodnota. Program PEC, jsem zapnul ještě před vložením vzorku, to je patrné z grafu (Obr. 26), kde vidíme, jak klesá teplota pece při jejím otevření, po vložení ohřívání vsázky dochází ke stabilizaci pece.

Ztráty otevřením a vkládáním vsázky jsem určil, tak že jsem odstranil nárůst příkonu (vyznačen světle modrou barvou), který trvá cca 0:01:30, a určil průměrnou hodnotu ztrát pece od bodu A. Jde o stejný postup výpočtu, jako u výpočtu celkových ztrát pece při ohřevu vzorků, jediný rozdíl je vtom, že jsem zanedbal nárůst příkonu při otevření pece. Poté jsem odečetl hodnoty v tabulce 5 a 6 a získal jsem ztráty pece otevřením dveří a vložním vsázky (Tab. 7).

Teplota pece	P _z Dural	P _z Měď	P _z Mosaz	P _z Železo	P _{zprům.}
[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
300	345,946	349,262	351,544	382,929	357,420
400	561,382	554,786	579,863	590,761	571,698
500	732,008	758,255	750,100	777,147	754,378

Tab. 6 Ztráty pece po eliminaci ztrát otevřením a vkládáním vzorků

Ztráty vzniklé otevřením dveří a vkládáním vsázky

Jde o rozdíl hodnot v tab. 5 a 6.

Teplota pece	P _z Dural	P _z Měď	P _z Mosaz	P _z Železo	P _{zprům.}
[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
300	27,813	48,080	34,800	38,714	37,352
400	17,599	34,508	21,737	27,614	25,364
500	16,610	34,765	23,885	37,008	28,067

Tab. 7 Ztráty pece při jejím otvírání a vkládání vzorků

Energie spotřebovaná při otvírání pece a vkládání vzorků

Je to okamžitá energie v bodě A v grafu (Obr. 26), získaná ze zaznamenaných hodnot programem PEC.

Teplota pece	W _{OT} Dural	W _{OT} Měď	W _{OT} Mosaz	W _{OT} Železo	W _{OTprům.}
[°C]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]
300	18,958	28,791	29,732	26,430	25,978
400	22,324	26,976	23,820	23,257	24,094
500	24,441	34,730	29,628	38,826	31,906

Tab. 8 Energie spotřebovaná při otvírání pece a vkládání vzorků

Ztráty pece při otvírání dveří, vztažené k celkové energii potřebné pro ohřev vzorku

Ve vyznačeném bodě A v grafu (Obr. 26), jsem vzal energii průběžnou, kterou zaznamenává program PEC a vztáhl ji k energii celkové potřebné na ohřev vsázky na požadovanou teplotu, to znamená, že otevřením pece se spotřebuje 7,73% celkové energie na ohřev vzorku (materiál dural). Měření jsem opakoval pro každou konečnou teplotu vzorku 3x, takže v Tab. 9, je uvedena průměrná hodnota ze tří měření.

Teplota pece	Dural	Měď	Mosaz	Železo
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]
300	11,59	16,80	10,87	13,63
400	7,25	10,00	8,08	8,35
500	4,98	11,00	7,95	11,36

Tab. 9 Ztráty pece při jejím otvírání a vkládání vzorků

6.1 Výpočet Biotova podobnostního kritéria

Z předešlého teoretického rozboru platí pro Biotovo kritérium vztah

$$Bi = \frac{\alpha s}{2\lambda}$$

s je reprezentativní tloušťka stěny vsázky, určující její „masívnost“ (může to být největší tloušťka u rovinné vsázky, nebo největší průměr válcové vsázky)

α Součinitel přestupu tepla ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

λ Součinitel tepelné vodivosti ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Pro tepelně tenkou vsázku platí $Bi < 0,25$

Hodnoty potřebné k výpočtu

Součinitel přestupu tepla $\alpha = 45 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Reprezentativní tloušťka stěny $s = 0,07\text{m}$

Součinitel tepelné vodivosti λ

Materiál	λ
[---]	[$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
Měď	380
Mosaz	108
Železo	73
Dural	181

Tab. 10 Součinitel tepelné vodivosti

Příklad výpočtu pro měděný vzorek

$$Bi = \frac{\alpha s}{2\lambda} = \frac{45 \cdot 0,07}{2 \cdot 380} = \underline{\underline{0,004145}}$$

$Bi < 0,25$

$0,004145 < 0,25$ Vsázka je tepelně tenká

Hodnoty biotova kritéria pro ostatní vzorky, jsou uvedeny v následující tabulce:

Materiál	Bi
[---]	[---]
Měď	0,004145
Mosaz	0,014583
Železo	0,021575
Dural	0,008702

Tab. 11 Výsledné hodnoty biotova kritéria

Pro všechny vzorky platí, kritérium $Bi < 0,25$, vsázka je tepelně tenká.

6.2 Výpočet hmotnosti z rozměrů vsázky a určení energie potřebné k ohřevu

Materiál	ρ [kg/m ³]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Měď	8930	383
Mosaz	8500	379
Dural	2800	913
Železo	7860	450

Tab. 12 Hodnoty potřebné pro výpočet m a W

$$V_{KVÁDRU} = a \cdot b \cdot b = 0,07 \cdot 0,035 \cdot 0,035 = \underline{\underline{0,00008575 \text{ m}^3}}$$

$$V_{VÁLCE1} = r_1^2 \cdot \pi \cdot h_1 = 0,006^2 \cdot \pi \cdot 0,02 = \underline{\underline{2,26195 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}}$$

$$V_{VÁLCE2} = r_2^2 \cdot \pi \cdot h_2 = 0,003^2 \cdot \pi \cdot 0,015 = \underline{\underline{4,24115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3}}$$

$$\begin{aligned} V_{CELK.} &= V_{KVÁDRU} - (V_{VÁLCE1} + V_{VÁLCE2}) = \\ &= 0,00008575 - (2,26195 \cdot 10^{-6} + 4,24115 \cdot 10^{-7}) = \underline{\underline{8,30639 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3}} \end{aligned}$$

$$m = \rho \cdot V_{CELK.} \quad [kg]$$

Hmotnost vzorků je uvedena v následující tabulce

Materiál	m [kg]
Měď	0,741761
Mosaz	0,706043
Dural	0,232579
Železo	0,652883

Tab. 13 Výsledná hmotnost vsázky

Teoretický výpočet energie potřebné pro ohřev vzorku

Měrná tepelná kapacita tělesa c (J.kg⁻¹.K⁻¹)
 Výchozí teplota vzorku $\vartheta_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$$W = m \cdot c \cdot \Delta \vartheta \quad [J]$$

Příklad výpočtu

Materiál měď, konečná teplota vzorku $\vartheta_0=250\text{ °C}$

$$Q_{Cu} = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta = 0,741761 \cdot 383 \cdot (250 - 40) = \underline{\underline{59659,83\text{ J}}}$$

$$W_{Cu} = \frac{Q_{Cu}}{3600} = \frac{59659,83}{3600} = \underline{\underline{16,572\text{ Wh}}}$$

Materiál	$\Delta\vartheta$ (210 °C)	$\Delta\vartheta$ (310 °C)	$\Delta\vartheta$ (410 °C)
[---]	[Wh]	[Wh]	[Wh]
Měď	16,572	24,464	32,355
Mosaz	15,609	23,043	30,476
Dural	12,387	18,285	24,184
Železo	17,138	25,299	33,460

Tab. 14 Energie potřebná k ohřevu vzorku

Měrná spotřeba

Materiál	$\Delta\vartheta_m$ (210 °C)	$\Delta\vartheta_m$ (310 °C)	$\Delta\vartheta_m$ (410 °C)
[---]	[Wh/kg]	[Wh/kg]	[Wh/kg]
Měď	22,342	32,981	43,619
Mosaz	22,108	32,636	43,164
Dural	53,258	78,619	103,981
Železo	26,250	38,750	51,250

Tab. 15 Měrná spotřeba

Energie na ohřev vzorku získaná měřením

Tuto hodnotu počítá program PEC. Opět jsem ze třech opakovaných měření udělal jednu průměrnou hodnotu a výsledky jsem zanesl do tabulky.

Teplota pece	Dural	Měď	Mosaz	Železo
[°C]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]
300	162,657	171,406	221,852	185,894
400	302,096	269,586	329,322	276,956
500	374,232	316,069	373,189	347,493

Tab. 16 Celková energie získaná z měření

Energii potřebnou k ohřátí vzorků získáme z Tab. 16, kde je uvedena celková energie získána z měření, od ní odečteme energii při stabilizaci samotné pece (Tab. 3) a přičteme energii spotřebovanou při otvírání dveří a vkládání vsázky (Tab. 8).

Teplota pece	Dural	Měď	Mosaz	Železo
[°C]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]
300	-6,949	1,644	-1,906	2,564
400	15,480	21,985	24,351	25,970
500	52,630	76,929	68,707	95,705

Tab. 17 Energie potřebná na ohřev vzorku získaná měřením

Př. Výpočtu: Dural teplota pece 300 °C.

$$W_{D_{300}} = W_{D_{300_Cel}} + W_{D_{OT}} - W_Z = 162,657 + 18,985 - 188,564 = \underline{\underline{-6,949Wh}}$$

Měrná spotřeba

Teplota pece	Dural	Měď	Mosaz	Železo
[°C]	[Wh/kg]	[Wh/kg]	[Wh/kg]	[Wh/kg]
300	-29,880	2,216	-2,700	3,928
400	66,557	29,640	34,489	39,778
500	226,290	103,711	97,313	146,588

Tab. 18 Měrná spotřeba získána z měření

Odchylka naměřené energie od vypočtené

Jako hodnota 100%, je brána vždy vyšší hodnota energie. Odchylky δ jsou uvedeny v následující tabulce.

Teplota pece	Dural	Měď	Mosaz	Železo
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]
300	-56,10	9,92	-12,21	14,96
400	-18,12	-11,27	5,37	2,58
500	54,05	57,94	55,64	65,04

Tab. 19 Odchylka mezi naměřenou a vypočtenou energií

Příklad výpočtu Dural, teplota pece 300 °C.

$$\delta = \left(\frac{W_{DU}}{W_{DU_{300}}} \cdot 100 \right) = \left(\frac{-6,949}{12,387} \cdot 100 \right) = \underline{\underline{-56,10\%}}$$

V kapitole 6.2 byla použita literatura [14].

6.3 Chyby měření

- 1) Chyba měření
- 2) Chyba oxidací materiálu

Ad1) Chyba měření

To znamená, že každý použitá součást pro měření má svou vlastní chybu (měřicí karta, převodníky U a I), tyto chyby se ve výsledku sčítají a tak zkreslují naměřenou hodnotu.

Měřicí karta – chyba 0,1%.

Převodník proudu – Třída přesnosti 0,5 (T_p) pro rozsah 1000 A (x_m); $m_x = \frac{T_p}{100} x_m$ $m_x = 5$ A, při

měření je hodnota proudu 10 A, chyba může dosahovat až 50 %.

Měřicí kleště jsou cejchovány s přístrojem BK550, při odběru 2 kW. S technické specifikace BK se dá odvodit, že relativní chyba měření příkonu je do 3% při 2 kW to znamená, že je absolutní chyba 60 W, když jsi tuto chybu dáme do souvislosti s energií potřebnou na ohřev vzorku, získanou měřením, zjistíme, že tato chyba na hlavní vliv na odchylku od teoretické hodnoty.

Chyby způsobené metodou měření

První částečná chyba je způsobena dotykem čidla a měřeného předmětu. Je-li teplota povrchu tělesa jiná než teplota termočlánu, tak při styku vsázky s termočlánek poklesne teplota v místě styku. Rozdíl teplot, je první chybou dotykového měření, ale tato chyba se dá zanedbat, protože termočlánek jsem po každém měření nechal vychladnout na stejnou teplotu (teplotu prostředí), jako měl vkládaný vzorek.

Druhá chyba styk termočlánu a měřené vsázky není téměř nikdy ideální, a proto je nutné uvažovat přechodný tepelný odpor, tomu ale zabráni šroub ve dveřích pece Obr. 22, to tvoří druhou částečnou chybu měření. Tato chyba se nedá číselně vyjádřit, ale můžeme předpokládat, že je při každém měření stejná (konstantní).

Ad2) Chyba oxidací materiálu

Měřené vzorky vlivem kyslíku a vysoké teploty v peci oxidovaly, a tím se měnily fyzikální vlastnosti materiálů, tomu jsem se snažil zabránit při prvním vložení vzorků do pece, kdy jsem je ohřál na teplotu 400 °C, aby se stabilizovaly chemické vlastnosti. Vzorek z mosazi se při opakovaném měření a teplotě vyšší než 400 °C oloupal a vypadal téměř jako nový.

7 Závěr

V mé diplomové práci jsem se zabýval popisem a měřením na muflové peci MP05-0.1, která je v laboratoři školy. V první části se věnuji teoretickému rozboru nepřímého odporového ohřevu. Dále jsou zde popsány všechny prvky, které byly u měření použity, ať už jde o přístroje či použitý program pro zaznamenávání naměřených dat na muflové peci. V praktické části probíhalo samotné měření na muflové peci, měl jsem k dispozici čtyři vzorky různých materiálů (měď, dural, mosaz a železo), zvolil jsem si konečnou teplotu pece (300, 400 a 500 °C) a konečnou teplotu vzorků, ta byla o 50 °C menší než T_p (250, 350 a 450 °C), měření jsem opakoval 3x pro všechny tyto zvolené teploty. Toto měření je velice časově náročné, protože ke stabilizaci prázdné pece dochází v čase cca 90 minut a celkový čas doby ohřevu prázdné pece je kolem 120 minut, doby ohřevu vzorku se pohybují okolo 30 minut, takže na změření všech vzorků a ke stabilizaci pece a ochlazení termočlánku, který snímá teplotu vzorku, připadá celkový čas měření okolo 285 minut. Ještě před započítáním měření jsem ohřál celou sadu vzorků na vysokou teplotu, aby došlo ke stabilizaci jejich chemických vlastností.

V poslední části diplomové práce se zabývám vyhodnocováním naměřených dat, které zaznamenal program PEC, protože jsem měření opakoval 3x, určil jsem rozptyl mezi jednotlivými měřeními, ať už při ohřevu prázdné pece nebo pece se vzorkem, měření s příliš velkými odchylkami jsem zanedbal a v dalších částech výpočtu, už nebylo použito.

Určoval jsem ztráty pece, které jsem uvedl v tab. 1, je to průměrná hodnota ze tří opakovaných měření po stabilizaci pece. Dále jsem určoval ztráty pece při ohřevu vzorků, z těchto ztrát jsem určil ztráty vzniklé otvíráním dveří pece a vkládáním vsázky a to eliminací nárůstu příkonu po vložení vsázky.

Uvádím zde výpočty biotova podobnostního kritéria pro všechny měřené vzorky, pro které platí $Bi < 0,25$ vsázka tepelně tenká, u takové vsázky teplota vnitřku vsázky sleduje teplotu jiného povrchu téměř bez časového zpoždění. V každém časovém okamžiku lze vsázku posuzovat jako rovnoměrně prohřátou.

Dále se zde zabývám srovnáváním vypočtené teoretické energie potřebné pro ohřev vzorků a měrnou spotřebu s hodnotami určených z měření. U hodnot určených z měření jde o průměrné hodnoty ze tří opakovaných měření. Vzniklé odchylky jsou docela velké, to je zapříčiněno použitými přístroji na měření, oxidací materiálu, tyto chyby mají velký vliv na výslednou přesnost měření. V elektronické příloze jsou všechna výstupní data z programu PEC.

Seznam literatury

- [1] HRADÍLEK Z., *Elektrotepelná technika - Skripta VŠB -TU*. Ostrava : VŠB-TU, 1996
- [2] RADA J., a kol: *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL, 1985
- [3] HRADÍLEK Z., a kol: *Elektrotepelná zařízení*. Praha: IN-EL, 1997
VŠB-TU, 2001
- [4] ŽÍDEK J., GAVLAS J., *Elektrické teplo : Návodů do cvičení - Skripta VŠB -TU*. Ostrava : VŠB-TU, 1990
- [5] HRADÍLEK Z., a kol: *Elektrotepelná technika : Simulace-počítačové programy*. Ostrava : VŠB-TU, 2001
- [6] KREIDL M.: *Měření teploty: Senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN 2005
- [7] KRÁL V.: *Optimalizace rezistenčního nepřímého ohřevu*. Ostrava : 2008 Disertační práce na fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO. Vedoucí práce Prof. Ing. Hradílek Z, DrSc.

Internetové odkazy

- [8] VŠB-TUO; http://fei1.vsb.cz/kat451/studium/f_studium.htm - *Užití elektrické energie* sylaby
- [9] JSP Měření a regulace; http://www.jsp.cz/files/uvod_C.pdf - *Termočlánky*
- [10] OPTING SERVIS;
http://www.optingservis.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=165&Itemid=9 *Muflová pec MP05-0.1*
- [11] ODPOROVÉ PECE; <http://www.labo.cz/martinek/> - *Muflová pec MP05-0.1*
- [12] Manuál dodávaný k muflové peci MP05-0.1
- [13] AHLBORN; <http://www.ahlborn.cz/download/File/MA23901.pdf> - *Informace Almemo*

Použité konstanty pro výpočty

- [14] http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepelná_vodivost - *tepelná vodivost materiálů*
 - [15] http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html - *součinitel přestupu tepla*
 - [16] <http://adambenda.net/index.php?id=10021> – *měrná tepelná kapacita*
 - [17] <http://www.labo.cz/mft/vl.php> - *hustota materiálů*
-